

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

NANOTECHNOLOGIE ET EMBALLAGES ALIMENTAIRES: ENJEUX,
ACTEURS ET IMPACTS

MÉMOIRE
PRÉSENTÉ
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN SCIENCE DE L'ENVIRONNEMENT

PAR
SOUAD GHALI

JUIN 2017

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.10-2015). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier ma directrice de mémoire, Madame Louise Vandelac, professeure titulaire au département de sociologie et directrice de l'Institut des sciences de l'environnement (ISE) de l'Université du Québec à Montréal au moment du début de mon mémoire en 2013, pour sa confiance, son aide et ses précieux conseils tout au long de la réalisation de ce travail, et pour m'avoir lancée dans le monde des nanotechnologies. Je la remercie pour ses relectures attentives et de ses nombreuses suggestions de corrections.

Je tiens aussi à remercier mon codirecteur, Monsieur Claude Emond, professeur à l'Université de Montréal, pour son aide et ses conseils précieux.

Je suis également reconnaissante à l'Institut des sciences de l'environnement de l'UQAM pour les perspectives de recherche qu'il m'a ouvertes. Je remercie aussi tout l'ensemble des professeurs (es) qui m'ont enseigné les deux années de maîtrise.

Je remercie également mon mari Karim pour son aide, sa présence et pour son soutien moral durant ma période d'études et pendant les moments difficiles, merci.

Je remercie essentiellement mon amie Sandra pour son aide, ses conseils précieux et son soutien moral pendant les moments difficiles, merci.

À tous, je veux exprimer ma sincère considération et ma reconnaissance, résumée en un mot sublime «Merci.»

Je dédie ce mémoire à ma famille, en particulier mes parents et mon grand frère Salah, à ma belle-famille et à mes petits anges Sophie, Racim et sylvia, je vous aime.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	ii
LISTE DES TABLEAUX.....	iii
RÉSUMÉ.....	vii
ABSTRACT.....	ix
INTRODUCTION.....	
CHAPITRE I	
PROBLÉMATIQUE.....	4
I.1 Champs des nanotechnologies et leurs applications.....	4
I.2 Caractéristiques, intérêts et enjeux des nanotechnologies.....	7
I.2.1 Enjeux économiques.....	21
I.2.2 Enjeux sociaux.....	23
I.3 Les nanotechnologies dans le secteur agroalimentaire.....	24
I.4 Risques sanitaires et environnementaux des nanotechnologies utilisées dans le secteur de l'agroalimentaire.....	29
I.5 Évaluation des risques sur la santé et l'environnement des nanotechnologies du secteur agroalimentaire	32
I.6 Conclusion du Chapitre I.....	34
CHAPITRE II	
ORIENTATIONS THÉORIQUES ET MÉTHODOLOGIQUES.....	36
II.1 Approches théoriques et méthodologiques.....	36
II.1.1 Approche écosanté.....	38
II.1.2 Approche cycle de vie.....	42
II.1.3 Le développement durable.....	45
II.1.4. L'interdisciplinarité.....	47
II.2. Objectifs.....	49
II.3 Hypothèses.....	49

II.4	Approche Méthodologique.....	49
II.5	Conclusion du Chapitre II.....	56
CHAPITRE III		
	ÉVOLUTION DU DOSSIER DU NANO-EMBALLAGE.....	57
III.1	Historique.....	57
III.2	Types d’emballage alimentaire.....	59
III.3	Mise en contexte de l’industrie de l’emballage alimentaire	60
III.4	Le poids de l’industrie de l’emballage alimentaire	62
III.5	Facteurs influençant l’industrie des emballages alimentaires	67
III.5.1	Pressions des consommateurs.....	67
III.5.2	Pressions des transformateurs alimentaires.....	69
III.5.3	Pressions des détaillants.....	71
III.6	Conclusion du Chapitre III.....	72
CHAPITRE IV		
	PROBLÉMATIQUE: SECTEUR NANOALIMENTAIRE ET EMBALLAGES.....	74
IV.1	Emballages alimentaires à base de nanoparticules.....	74
IV.1.1	Emballage intelligent.....	75
IV.1.2	Emballage actif.....	77
IV.1.3	Emballage biodégradable.....	78
IV.2	Avantages des nanomatériaux pour les emballages alimentaires.....	78
IV.2.1	Les emballages contenant Nano-argent.....	80
IV.2.2	Les emballages contenant dioxyde de titane.....	81
IV.2.3	Les emballages contenant Nanotubes de carbone.....	82
IV.3	Ampleur, et diversité des applications et des enjeux.....	82
IV.4	Risques pour l’environnement des nano-emballages.....	83
IV.5	Risques pour la santé humaine des nano-emballages.....	86
IV.5.1	Migration des nanoparticules dans les denrées alimentaires.....	88
IV.5.2	Toxicité des nano-emballages.....	93
IV.6	Conclusion du Chapitre VI.....	95

CHAPITRE V	
ACTEURS, ENJEUX ET ENCADREMENT DU NANO-EMBALLAGE.....	96
V.1 Industries de nano-emballages.....	96
V.2 Tendances de l'industrie du nano-emballage alimentaire.....	97
V.3 Organisations partenaires.....	98
V.4 Consommateurs.....	98
V.5 Gouvernements.....	100
V.6 Encadrement législatif et réglementaire.....	101
V.6.1 Encadrement législatif et réglementaire en Europe.....	102
V.6.2 Encadrement législatif et réglementaire en Amérique du nord.....	105
V.6.3 Encadrement législatif et réglementaire en Brésil.....	107
V.7 Conclusion du Chapitre V.....	108
CONCLUSION.....	109
BIBLIOGRAPHIE.....	113

LISTE DES TABLEAUX

Tableau	Page
Tableau I.1 Preuves expérimentales de l'écotoxicité de nanomatériaux actuellement commercialisées.....	20
Tableau I.2 Secteurs, applications et fonctions développés dans le secteur nanoalimentaire	27
Tableau III.1 Repères de l'histoire de l'emballage alimentaire	58
Tableau III.2 Facteurs influençant l'industrie de l'emballage alimentaire : Pressions des consommateurs.....	68
Tableau III.3 Facteurs influençant l'industrie de l'emballage alimentaire : Pressions des transformateurs alimentaires.....	70
Tableau III.4 Facteurs influençant l'industrie de l'emballage alimentaire : Pressions des détaillants.....	71

RÉSUMÉ

Suite à la révolution industrielle, la nanotechnologie ouvrirait-elle une nouvelle révolution technologique ? Nous ne sommes encore qu'au début des développements de la nanotechnologie. Les scientifiques et les industriels ont déjà identifié des utilisations potentielles de la nanotechnologie dans pratiquement tous les segments de l'activité économique. C'est le cas notamment en agriculture et dans l'industrie alimentaire, pesticides, engrais, livraison de vaccins, détection d'agents pathogènes dans les plantes et les animaux; transformation des aliments, encapsulation de saveurs, d'odeurs ou exhausteurs de goût; modification de la texture des aliments ou nouvelles qualités; gélification ou agent viscosifiant, etc.,. Nous pouvons ajouter à cette liste les emballages alimentaires, plus résistants, plus imperméables aux gaz et plus résistants à la chaleur (Pérez-Esteve *et al.*, 2013).

Selon plusieurs sources, l'emballage est l'un des secteurs les plus actifs de recherche et développement de la nanoscience alimentaire, notamment parce que ces développements sont susceptibles d'être largement appliqués à d'autres domaines d'activités (Commission de l'Éthique en Science et en Technologie (CEST), 2011; Duncan, 2011; von Lowis, 2012; Pérez-Esteve *et al.*, 2013). Au plan mondial, l'industrie de l'emballage totalise plus de 650 milliards de dollars US et emploie 5 millions de personnes dans 100 000 entreprises (dont plus de 65 % concernent le secteur alimentaire¹). Le marché global du nano-emballage dans l'alimentation et les boissons a été estimé, selon le rapport de Persistence Market Research, à 6,5 milliards de dollars en 2013, et son taux de croissance annuel serait de 12,7 % qui pourrait atteindre environ 15,0 milliards de dollars en 2020 (Bumbudsanpharoke et Ko, 2015). De telles estimations de croissance sont accompagnées d'inquiétudes et de préoccupations concernant les risques pour la santé humaine et l'environnement, que représente l'introduction des nanoparticules dans les emballages alimentaires.

Ce mémoire vise, à partir d'une revue de littérature, à analyser le domaine de l'emballage alimentaire basé sur les nanotechnologies ainsi qu'à faire une recension des impacts sur la santé humaine et l'environnement des nanoparticules ajoutées dans ces emballages. Nous examinerons également l'état de ce marché mondial des nano emballages alimentaires, notamment en nous intéressant aux firmes impliquées, les acteurs majeurs, les intérêts et les enjeux. Ce mémoire est mené selon deux approches; écosanté et cycle de vie, mettant en évidence les questions de santé des

Source: ¹ http://www.groupeexport.ca/uploads/contribute/fr/bulletins/201211/documents/Emballagealimentaire_000.pdf. Consulter le: 02/12/2015

individus, des populations et des milieux de vie, permettant d'examiner les enjeux socio-économiques et culturels, sanitaire et environnementaux (Vandelac, 2006, cité dans Berge, 2013). Ces approches nous ont semblé les plus pertinentes à l'étude du dossier des nano-emballages.

Mots-clés: Nanotechnologie, Nanoparticules, Nanomatériel, Nanotechnologie, , Nano-emballage et environnement, Nano-emballage et santé, Éco-santé, Nanotechnologie, Réglementation, Nano-emballage, législation, Nano-emballage, Nano-alimentaire, Emballage alimentaire, cycle de vie.

ABSTRACT

Following the industrial revolution, would nanotechnology open a new technological revolution? We're still in the early development of nanotechnology. Scientists and industrialists have already identified the potential uses of nanotechnology in virtually every segment of the economy, including agriculture and the food industry, pesticides, fertilizers, delivery of vaccines, detection of pathogens in plants and animals; food processing, encapsulation of flavors, scents or flavorings; modifying the texture of foods or new qualities; viscosifying or gelling agents, etc .. We can add to that list food packaging that are more resistant, more impermeable to gases and more resistant to heat (Pérez-Estevee *et al.*, 2013).

According to several sources (CEST, 2011; (Duncan, 2011; von Lowis, 2012) packaging is one of the most active field of research and developmental sector of nanoscience food, because these developments are likely to be widely applied to other areas of activity. Globally, the packaging industry totals more than 650 billion US dollars and employs 5 million people in 100 000 companies (over 65% regarding the food sector). The global market for nano-packaging of food and drinks was estimated, according to the report Persistence market Research, 6.5 billion in 2013, its annual growth rate is 12.7% which could reach about \$ 15.0 billion in 2020 (Bumbudsanpharoke and Ko, 2015). Such growth estimates are accompanied with worries and concerns regarding the risks that the introduction of nanoparticles in food packaging represents for the human health and environment.

This thesis based on literature review is designed to analyze the field of food packaging based on nanotechnology and to make a review of the impacts on human health and the environment of nanoparticles added to these packages. This memory also reviews the state of the global market for nano food packaging, the firms involved, the major players, interests and issues. It is conducted according to an EcoHealth approach and a life cycle approach, highlighting individual health issues, populations and living environments, which allow the observation of socio-economic, cultural, health and environmental issues (Vandelac, 2010). These approaches have appeared to be the most relevant to the study of nano-packaging folder.

Keywords: Nanotechnology, Nanoparticle, Nanomaterial, Nanotechnology risk, Nano-migration Nano-packaging and environment, Nano-packaging and health, Eco-health, Nanotechnology, regulation, Nano-packaging, legislation, Nano-packaging, Nano-food, Food packaging, Nano-packaging, Life cycle.

INTRODUCTION

Les nanotechnologies ont considérablement gagné en importance dans la science et l'économie (Del Castillo, 2010). Elles ont, selon l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture et l'Organisation mondiale de la santé (FAO/OMS, 2011) « ouvert de vastes perspectives pour le développement de nouvelles applications scientifiques et le développement de nouveaux produits industriels et de consommation ». On évoque notamment la possibilité de produire des matériaux « plus solides, plus résistants et mieux formables ou déformables » (Obadia, 2008); des médicaments mieux ciblés notamment pour combattre les tumeurs cancéreuses ou d'autres maladies graves tel le Sida ; on prétend qu'un tel saut technologique est porteur de percées nouvelles dans les technologies de l'information et de la communication, et l'on estime que cette ouverture constitue un grand progrès dans le domaine des économies d'énergie et des énergies nouvelles (Obadia, 2008).

Si on en croit Montfort-Windels et Lecomte, (2008), Genest et Beauvais, (2009) et (Obadia, 2008), presque toutes les branches de l'industrie seront influencées par la nanotechnologie dans l'avenir.

Ce mémoire sur l'utilisation des nanoparticules dans l'emballage alimentaire vise à brosser un portrait global de ce marché. Dans le domaine alimentaire, l'usage des nanoparticules d'argent, de dioxyde de titane, de dioxyde de silicone ou les nanoargiles introduites dans les emballages alimentaires auraient pour objectifs, selon les promoteurs de préserver la qualité nutritionnelle des aliments et d'éviter leur détérioration surtout après l'ouverture de l'emballage (Netpak, 2015). Ces

nanoparticules pourraient améliorer les propriétés mécaniques et la résistance à la chaleur des emballages, bloquer le passage de la lumière ultraviolet et développer des surfaces antimicrobiennes et antifongiques, selon (Netpak, 2015, Bumbudsanpharoke and Ko, 2015). Tandis que l'intérêt de l'industrie dans la nanotechnologie augmente, cette opportunité économique et sociale suscite des craintes et soulève un certain nombre de questions d'ordre sanitaire, environnemental, social, politique, éthique et réglementaire.

Ce mémoire vise, à partir d'une revue de littérature, à explorer le domaine de l'emballage alimentaire intégrant des nanoparticules, non seulement en tant que marché, mais en identifiant les types de nanoparticules incorporées dans ces emballages et leurs impacts potentiels sur la santé et l'environnement. L'examen du marché mondial du secteur des nanoemballages destinés au secteur alimentaire, selon les principaux axes de développement, les acteurs majeurs et les firmes impliquées, permettra de mieux circonscrire les principaux enjeux en identifiant les intérêts, les acteurs et les risques majeurs.

Le premier chapitre explorera le champ des nanotechnologies et ses applications dans le secteur alimentaire. Nous y aborderons les caractéristiques, intérêts et enjeux économiques et sociaux relatifs aux nanotechnologies. À l'instar d'autres secteurs, l'industrie agroalimentaire s'est intéressée à l'utilisation des nanotechnologies pour le développement des produits. Nous allons également aborder les questions des risques sanitaires et environnementaux des nanotechnologies utilisées dans ce secteur.

Puisque nous nous intéressons à l'évaluation des impacts sur l'environnement et la santé humaine liée à l'utilisation des nanotechnologies dans le secteur de l'agroalimentaire et des emballages alimentaires, nous avons opté pour une approche globale et multiniveaux de ces questions en nous inspirant de l'approche écosanté et de l'approche cycle de vie. Nous examinerons aussi, dans le deuxième chapitre, dans

quelle mesure l'introduction des nanoparticules dans l'emballage alimentaire est compatible avec le développement durable, ce qui exigera d'abord d'examiner les principales conceptions de développement durable.

Au troisième chapitre, nous examinerons le poids de l'industrie de l'emballage alimentaire et les facteurs qui influencent ces développements. Nous discuterons aussi de l'utilisation des nanoparticules dans les emballages alimentaires et des différents types de nanoemballages.

Dans le quatrième chapitre, nous aborderons les risques de migration des nanoparticules incorporées aux matériaux vers les aliments et les risques potentiels alors posés, qui encore peu évaluées, sont l'objet de débats entre scientifiques, ainsi qu'entre scientifiques, industriels, décideurs et écologistes.

Finalement, dans le cinquième chapitre, nous examinerons le poids de l'industrie du nanoemballages, ainsi que le rôle que jouent les autres parties prenantes de ce secteur. Nous aborderons aussi les questions d'évaluation et d'encadrement réglementaire censées assurer la protection de la santé et de l'environnement. Nous le ferons à la fois pour le Canada comme l'exige la loi canadienne sur la protection de la santé et de l'environnement, mais également pour les États unis, l'Europe et le Brésil.

CHAPITRE I

PROBLÉMATIQUE

I.1 Champs des nanotechnologies et leurs applications

Les nanotechnologies constituent un important secteur en émergence, qui selon certains experts constituera un important moteur de développement économique Dobrucka, (2014), tout comme l'informatique l'a été il y a quelques dizaines d'années (Montfort-Windels et Lecomte, 2008). Selon Browaeys (2009), « Certains y voient des solutions aux défis qui sont devant nous, aussi bien en matière d'énergie, de communication, ou de santé, etc.,». D'autres s'inquiètent sur les impacts sur la santé et l'environnement des processus de production des nanomatériaux, des problèmes de transport, de stockage et de cycle de vie de ces matériaux et prévoient une catastrophe comme celle des OGM (ibid.).

En 2016 il n'y a toujours pas, de véritable consensus scientifique sur la définition des nanosciences et des nanotechnologies. Néanmoins, bien qu'elle soit encore l'objet de controverse, la définition des nanotechnologies s'inscrit dans les balises suivantes:

1) La taille des éléments manipulés est de l'ordre du nanomètre (10^{-9}) (Béland et Patenaud, 2009; Anderson *et al.*, 2009; Vinck, 2009). Selon Béland et Patenaude, la nanotechnologie est constituée par l'ensemble des techniques utilisées pour concevoir, caractériser et produire des matériaux qui ont au moins une dimension dans l'échelle nanométrique;

- 2) « L'émergence de ce champ s'appuie sur la convergence avec d'autres champs apparemment éloignés et dissociés;
- 3) Un mélange de deux logiques de constitution de la connaissance scientifique: d'un côté la miniaturisation et de l'autre l'assemblage atome par atome »².

L'émergence des sciences et des technologies de l'infiniment petit résulte largement de l'invention de la microscopie électronique, il y a plus de trente ans, laquelle a permis d'explorer la matière jusqu'au niveau atomique (Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS, 2005). Depuis, les avancées technologiques ont permis aux scientifiques de faire des progrès non seulement dans le domaine de l'observation et de l'analyse de la matière, mais aussi dans le domaine de la compréhension des processus physico-chimiques, ce qui a abouti à «des annonces parfois surdimensionnées» (Béland et Patenaud, 2009) concernant le potentiel des nanosciences et des nanotechnologies (op. cit.).

Face aux nombreux défis au 21^e siècle, dont ceux de répondre durablement à la demande mondiale croissante d'énergie et de biens de consommation, des rapports de (la FAO et de l'OMS. 2011) prétendent que la nanotechnologie a ouvert de vastes perspectives pour le développement de nouveaux produits et applications dans plusieurs domaines scientifiques et dans de nombreux secteurs industriels et de la consommation. Certains analystes soulignent même que les futures révolutions industrielles et sociétales impliqueront les nanotechnologies et que les pays qui n'entrent pas dans ce "train technologique" risquent d'avoir de grandes difficultés économiques dans le futur (Plana, 2013).

Les nanotechnologies constituent donc l'un des domaines d'investissements majeurs en matière de sciences et technologies dont le potentiel d'application semble énorme

² Source: http://www.researchesnanoclusters.eu/index2.php?option=com_content&do_pdf=1&id=24 consulter le 15-01 2015

(Montfort-Windels et Lecomte, 2008). Elles ont ainsi conquis tous les champs de la vie courante et déjà un grand nombre de produits qualifiés de nanotechnologies par les manufacturiers sont sur le marché. Leur nombre aurait connu, «entre 2006 et 2008, une augmentation mensuelle de plus de 20% pour atteindre quelques 800 produits en 2009» (Genest et Beauvais, 2009 cité dans Berge, 2013). En 2010, l’Affset a comptabilisé en France, 246 produits de consommation courante contenant des nanomatériaux (Affset, 2013). Le projet sur les nanotechnologies (PEN) du Woodrow Wilson Institute recense « 1628 produits contiendraient des nano sur le marché mondial, 440 sur le marché européen » (Greco *et al.*, 2014). Actuellement « estimé à 100 milliards d’euros, le marché international des nanomatériaux devrait franchir la barre des 1 700 milliards d’euros en 2014 et représenter 15 % de la production manufacturière mondiale » (ibid.). Ces chiffres sont probablement sous-évalués, car les industriels n’ont pas toujours l’obligation de déclarer l’utilisation des nanoparticules dans la fabrication de leurs produits (Affset, 2013).

Dans le domaine des nanotechnologies, la recherche agroalimentaire s’intéresse, entre autres, à la création d’aliments dits « intelligents » agissant de manière interactive en fonction, dit-on, des besoins nutritifs du consommateur (Obadia, 2008). Il faut noter, ajoute Obadia, «l’extrême sensibilité de ce domaine d’application des nanotechnologies, l’alimentation étant un sujet touchant à l’intégrité de la personne».

Parmi les nombreuses autres applications des nanotechnologies dans le secteur agroalimentaire, notons l’utilisation de nanoparticules dans les emballages alimentaires visant à augmenter le temps de conservation des produits ou à développer des nanodispositifs de surveillance des aliments depuis l’extraction des matières premières à travers toute la chaîne de transformation, jusqu’à la fin de vie d’un produit (op. cit.).

I.2 Caractéristiques, intérêts et enjeux des nanotechnologies

Les nanoparticules possèdent des propriétés physicochimiques et électrostatiques très particulières, en raison de leur taille nanométrique et surtout en raison de leur surface puisqu'elles quittent «l'univers de la chimie et de la physique classique pour entrer dans celui de la mécanique quantique» (ETC Group, 2004, p. 4 ; Wiesner et Bottero, 2007). La taille nanométrique, le ratio surface/volume élevé des NPs, la complexité chimique, la nature et l'expansion des faces minéralogiques leur confèrent des propriétés magnétiques, de réactivité chimique, de résistance mécanique et de conductivité thermique (Jang *et al.*, 2001; Wang et Ro, 2006; Wiesner et Bottero, 2007 ; Afssa, 2008; Bhatt et Tripathi, 2011) qui permettent de nombreuses applications dans des domaines très variés, allant du textile, aux cosmétiques, de l'alimentation à l'imagerie médicale, de la vectorisation de médicament à l'environnement, en passant par l'électronique, la chimie, le bâtiment, etc.. (Bottero, 2006).

Ces propriétés peuvent rendre aussi les nanoparticules potentiellement toxiques et mobiles dans le milieu naturel (Geremew de l'université Ghent Flandre, Belgique, 2012).

La destinée environnementale et l'écotoxicité des nanoparticules est influencée par un grand nombre de facteurs comme la taille des particules et leur distribution, la solubilité, l'état d'agrégation, la nature chimique ou minéralogique, la cristallinité, la surface spécifique, la charge de surface, la concentration (masse et nombre), la structure ou encore la présence d'impuretés (Tiede K., 2009).

Certaines nanoparticules très sensibles aux conditions d'oxydoréduction peuvent être sous certaines conditions potentiellement dangereuses pour l'être humain (op. cit.). Les nanoparticules manufacturées, disséminées dans le milieu naturel, sont pour bon

nombre considérées comme des polluants ou des sources de contamination des eaux, des sols et des sédiments (Keller *et al.*, 2010 ; Urrea, 2013).

En 2006, la fondation américaine «Project on Emerging Nanotechnologies»³ (PEN) avait estimé que « plus de 58 000 tonnes de nanomatériaux seraient produites entre 2011 et 2020, et que leur impact écologique pourrait être équivalent à celui posé par 5 millions à 50 milliards de tonnes de matériaux conventionnels » (Guillaud, 2009). Mais, ajoutait cet auteur, on sait encore peu de choses sur la répercussion et le comportement de ces nanomatériaux dans l'environnement, bien que les études en écotoxicologie aient permis de combler certaines lacunes au cours des dernières années (op.cit.).

En 2012, l'Anses a mis en place un groupe d'experts dédié à l'actualisation des connaissances sur les enjeux sanitaires et environnementaux liés à l'exposition aux nanomatériaux. D'après ce groupe, les incertitudes restent importantes quant aux effets des nanomatériaux sur la santé et l'environnement, malgré les progrès de la connaissance scientifique. Cela qui exige selon l'Agence de mettre en place

Un encadrement réglementaire renforcé des nanomatériaux manufacturés, afin de mieux caractériser chaque substance et ses usages, en prenant en compte l'ensemble du cycle de vie des produits. Le faisceau de données disponibles sur la toxicité de certains nanomatériaux apparaît en effet à l'Anses scientifiquement suffisant pour envisager leur encadrement selon la réglementation européenne CLP (règlement de classification, étiquetage et emballage des substances et des mélanges) et REACH (substances chimiques). L'Anses a, dans ce cadre, publié en avril 2014 des recommandations visant à adapter le règlement REACH à la prise en compte des caractéristiques propres aux nanomatériaux.

³ Créé en 2005, en partenariat avec le Centre international Woodrow Wilson et les Pew Charitable Trusts, ce projet avait pour but d'aborder les aspects sociaux, les aspects de politiques publiques et les risques associés à la nanotechnologie. <http://www.nanotechproject.org>.

Ce cadre réglementaire permettrait de renforcer la traçabilité des nanomatériaux destinés à être intégrés dans les produits de consommation, depuis leur production jusqu'à leur distribution, afin notamment de mieux caractériser les expositions des populations, et permettre de mieux cibler les évaluations de risque à réaliser. Ces évaluations de risques peuvent conduire dans le cadre de la réglementation REACH à des mesures de restriction d'usage voire d'interdiction (Anses, 2014, s.p.).

Dans ses orientations de 2017, les risques liés aux nanomatériaux sont une priorité pour l'Anses, qui entend mener ses travaux selon trois axes:

1. La poursuite de la gestion du portail de déclaration nationale;
2. Le suivi des travaux relatifs à l'encadrement réglementaire de nanomatériaux particuliers et aux différentes discussions européennes faisant suite à sa proposition de classification;
3. Un suivi de la saisine des pouvoirs publics concernant les risques associés aux usages des nanomatériaux dans le cadre de l'alimentation.

Selon l'Institut national de l'environnement industriel et des risques, les nanoparticules se retrouvent dans l'environnement par diverses voies (INERIS, 2007). Ainsi les nanoparticules présentes dans les matériaux de construction, par exemple, se trouvent, après lessivage ou dégradation, dans les eaux de ruissellement et dans les eaux usées en quantités relativement élevées (Tchangna, 2008). Pour les nanoparticules d'argent qui se trouvent dans les textiles anti-transpirants et anti-odeurs, ces tissus laissent s'échapper les nanoparticules au cours des lavages si bien qu'on les retrouve dans l'environnement via les eaux usées, puis parviennent par la suite à travers les canalisations dans les eaux de surface où elles sont fortement diluées et donc fort difficilement décelables (Armand, 2011).

Un autre mode de diffusion des nanoparticules dans l'environnement est l'utilisation des crèmes solaires contenant du dioxyde de titane, car ces crèmes se retrouvent après

un simple lavage dans le cycle de l'eau (Hsiao et Huang, 2011). La présence dans l'environnement de ces nanoparticules peut endommager les écosystèmes et avoir le potentiel d'affecter la santé humaine (Cedervall *et al.*, 2012). Dans son rapport intitulé « Évaluation des risques liés aux nanomatériaux » publié en mai 2014, l'Anses a souligné les effets encore méconnus de ces nanotechnologies. Notamment chez les animaux ou les végétaux.

Bien que l'être humain puisse être exposé à des nanoparticules issues de phénomènes naturels comme des nanoparticules contenues dans l'air respiré (la poussière fine) (Gruère, 2012), néanmoins, il importe de distinguer ces nanoparticules d'origine naturelles des nanoparticules manufacturées dont l'importance est croissante dans nos sociétés, et qui exposent la population générale par diverses voies (Tchangna, 2008, Aurélie, 2011).

Trois voies majeures d'exposition sont particulièrement préoccupantes, à savoir par inhalation (Oberdorter *et al.*, 2005 ; Park *et al.*, 2008), par ingestion (Thorpe, 2014) et la voie cutané (Tchangna, 2008 ; Sadriel *et al.*, 2010). Avec l'émergence de la nanomédecine, la voie sanguine représente également une porte de pénétration des nanoparticules dans l'organisme (Greco *et al.*, 2014).

- 1) L'entrée des nanoparticules dans l'organisme par l'ingestion et par les voies gastriques et intestinales peuvent permettre l'entrée des nanoparticules dans le système sanguin. Après avoir été inhalées ou ingérées et après avoir franchi les membranes pulmonaires ou gastro-intestinales, elles peuvent atteindre différents organes et s'accumuler à certains sites spécifiques (Thorpe, 2014). Une étude de Jani *et al.*, (1990) montre que l'administration par gavage de nanotubes de carbone chez la souris conduit, après trois heures, à un marquage aux niveaux pulmonaire, rénal et osseux, confirmant les effets potentiels de ces nanotubes de carbone sur la santé. Selon d'autres études, réalisées sur les souris et citées par

l'Anses (2011):

On observe, 3 h après administration par gavage (de 100 μ L d'une solution à 15 μ g/mL), les SWCNTs (\varnothing moy: 1,4 nm; Lmoy: 340 μ m) hydroxylés sont distribués dans la majorité des organes et tissus, à l'exception du cerveau (Wang *et al.*, 2004). Dans l'étude de Deng *et al* (2007), les auteurs ont exposé des souris par gavage à 100 μ g de [¹⁴C-aurine]- MWCNTs (\varnothing moy: non connu; Lmoy: 110-600 nm). La distribution des MWCNTs dans l'organisme a été observée jusqu'à 24 h après l'exposition. Il a été observé que les MWCNTs transitaient dans l'estomac, puis rapidement vers l'intestin grêle et le gros intestin. Ainsi, 74 % des MWCNTs ont directement été excrétés dans les fèces, 12 h après l'exposition (Anses, 2012, p10). Aucun passage dans la circulation sanguine n'a été observé.

- 2) L'entrée dans l'organisme par voie cutanée. La peau est constituée de deux couches (l'épiderme et le derme). Or, plus le diamètre des particules n'est petit, meilleure sera leur pénétration à travers l'épiderme. De plus, « un épiderme est facilement altéré (coupures, piquûres...) »⁴ et cela peut contribuer à une pénétration plus profonde des nanomatériaux en cas d'exposition (Tchangna, 2008). La pénétration dans l'organisme des nanomatériaux est due, notamment, à l'utilisation des produits cosmétiques qui en contiennent (lait de toilette, sérum, crème solaire...), mais généralement à l'insu des consommateurs puisque généralement ces substances nanos ne sont généralement pas identifiées (op.cit.).
- 3) L'entrée dans l'organisme par l'appareil respiratoire : chez l'Homme, l'exposition par inhalation représente la voie de contamination par ces nanomatériaux qui engendre le plus de préoccupations. Il existe deux systèmes de protection pulmonaire, en cas d'entrée de nanoparticules dans le système respiratoire. Le premier est situé dans les voies aériennes supérieures: les nanoparticules sont piégées dans le mucus puis évacuées vers l'arrière-gorge par des cils présents à la

⁴ Source: <http://nanotechna.e-monsite.com/pages/avantages-et-risques/risques.html>. Consulté le 14/04/2015

surface de l'épithélium des voies aériennes (Tchangna, 2008). Le second concerne les nanoparticules qui ont atteint le poumon plus profondément: elles sont phagocytées dans des macrophages alvéolaires, qui seront ensuite éliminés de l'organisme, dans les sécrétions respiratoires. Selon Aurélie (2011) « Si ces mécanismes d'épuration mucociliaire et alvéolaire sont saturés, l'inhalation de nanomatériaux pourrait provoquer une inflammation excessive et une destruction des tissus pulmonaires ». Ronzani *et al.* (2012), ont comparé une administration oropharyngée unique ou répétée de nanotubes de carbone (J0, J7 et J14) chez la souris. Pour cette étude:

(...) les quantités administrées étaient de 0,06, 0,25 et 1 mg/kg. Les auteurs montrent 1 jour après l'administration unique ou 7 jours après la dernière administration dans le cas d'une administration répétée (soit 21 jours après la première) une inflammation qui diffère sur quelques critères. L'administration unique induit une augmentation des neutrophiles dans le LBA, ainsi que de TNF- α , des chimiokines KC et IL-17. L'administration répétée entraîne une augmentation de neutrophiles, mais également de macrophages et d'éosinophiles. La présence de granulomes est notée. La présence de NTC dans les macrophages alvéolaires, les pneumocytes de type II et les neutrophiles infiltrés est soulignée (Anses, 2012: p19).

Dans l'étude de Deng *et al* (2007), les chercheurs ont exposé les souris à 100 μ g de [14C-aurine]- MWCNTs (\emptyset moy: non connu; Lmoy: 110-600 nm) par injection intratrachéale. Ils ont observé que la distribution des MWCNTs dans l'organisme jusqu'à 28 jours après l'exposition. Les nanotubes de carbone se sont principalement accumulés dans les poumons (Anses, 2011: p11).

Selon Sanchez *et al* (2009) «La biopersistance des particules solides dans l'organisme résulte de leur durabilité (c'est-à-dire de leur capacité à résister à la solubilisation ou à la dégradation chimique ou enzymatique) et de leur vitesse d'élimination par les processus biologiques (par exemple: épuration muco-ciliaire, prise en charge par les macrophages). La biopersistance des matériaux dans les tissus biologiques constitue

un élément important qui module leur potentiel toxique» (Anses, 2011: p11).

Muller *et al* ont étudié la persistance des MWCNTs (\varnothing moy: 9,7 nm; Lm: 5,9 μ m) et des MWCNTs broyés (\varnothing moy: 11,3 nm; Lmoy: 0,7 μ m) dans les poumons de rats exposés par instillation intratrachéale unique (0,5; 2 et 5 mg). À la plus faible dose (0,5 mg), 80 % des MWCNTs et 40 % des MWCNTs broyés ont été retrouvés dans les poumons 60 jours après l'administration. Les 6 DTP: Diéthylène triamine penta acide. Les auteurs concluent que les nanotubes de carbone sont persistants dans les poumons et que la cinétique de leur clairance est influencée par leur longueur (Muller *et al.*, 2005). Toutefois, Donaldson *et al.* soulignent que les nanotubes étudiés par Muller sont nettement plus courts que les fibres minérales considérées comme longues et mesurant près de 20 μ m (Donaldson *et al.*, 2006). En utilisant le dosage du nickel (0,53 % de la masse totale des NTCs) présent dans les MWCNTs (\varnothing moy: 20-50 nm; Lmoy: 0,5-2 μ m), d'autres auteurs ont montré que les MWCNTs ne traversent pas significativement la barrière épithéliale pulmonaire, mais sont toujours présents dans les poumons 6 mois après une administration intratrachéale chez le rat (Elgrabli *et al.*, 2008a). En utilisant le dosage du cobalt présent dans les MWCNTs (Baytubes \square) (\varnothing moy: 10-16 nm; Lmoy: 200-1000 μ m ; surface: 253 m \square /g), Ellinger-Ziegelbauer et Pauluhn ont rapporté une demi-vie d'élimination pulmonaire de 60 ou 140 jours chez le rat après une période d'inhalation par le nez de 6 h (respectivement 11 ou 241 mg/m \tilde{N}) (Ellinger-Ziegelbauer et Pauluhn, 2009). Chez des rats, après 13 semaines d'inhalation par le nez («nose-only») d'un aérosol des mêmes MWCNTs micronisés (Baytubes \square) (6 h/jour, 5 jours/semaine; 0,1; 0,4; 1,5 et 6 mg/m \tilde{N}), Pauluhn a rapporté des demi-vies d'élimination respectivement de l'ordre de $t_{1/2}$ = 151, 350, 318, et 375 jours (Pauluhn 2010a). Dans les études de Pauluhn, il est clair que la demi-vie d'élimination pulmonaire des MWCNTs dépend de la dose pulmonaire (Ellinger-Ziegelbauer et Pauluhn, 2009; Pauluhn 2010a). Le ralentissement de la demi-vie d'élimination a été attribué au phénomène de «surcharge alvéolaire 8». Selon les auteurs, le volume des MWCNTs est mieux corrélé au ralentissement de la demi-vie d'élimination de ces matériaux que la surface des MWCNTs. Pauluhn *et al.* attribuent aussi la toxicité de leur MWCNT à la surcharge des poumons (Anses, 2011, p11-12).

Ajoutons que ces diverses expositions peuvent être plus marquées dans certains contextes professionnels de production industrielle et d'utilisation des nanoparticules dans différents procédés de fabrication (Ostiguy *et al.*, 2008; Greco *et al.*, 2015), ainsi que lors du développement de nouvelles applications et lors de la multiplication des

études toxicologiques dans le secteur de la recherche qui peuvent également engendrer une exposition professionnelle, principalement pulmonaire (Greco et al., 2015).

Les nanomatériaux sont utilisés dans de très nombreuses applications. L'être humain est donc exposé aux nanoparticules dans sa vie quotidienne via un nombre croissant de sources. Cependant soulignent (Greco *et al.*, 2015)

Les données précises concernant le niveau d'exposition, le nombre de travailleurs concernés et les risques pour la santé sont encore peu nombreuses. Des enquêtes épidémiologiques sont en cours pour tenter de répondre à ces questions et d'établir des valeurs limites d'exposition et des moyens de prévention (Greco *et al.*, 2015)

Les propriétés toxicologiques liées aux nanoparticules ont fait l'objet de nombreuses études. Quoique ces études demeurent fragmentaires en ce qui concerne les divers aspects toxicologiques et la diversité des nanomatériaux évalués, de nombreux effets délétères ont été mesurés, notamment chez l'animal (Durand et Tossa, 2016).

Selon Miller et Kinnear (2008) « La recherche scientifique préliminaire a montré que nombre de types de nanoparticules peuvent provoquer l'augmentation du stress oxydatif, pouvant entraîner la formation de radicaux libres, dont peuvent résulter le cancer, la mutation de l'ADN et même la mort de cellules ». Ils ajoutent que des fullerènes, ou nanoparticules de carbone « ont été trouvés à l'origine de lésions cérébrales chez la perche à grande bouche, une espèce admise par les organismes de régulation comme modèle pour définir les effets écotoxicologiques ».

Dans son rapport de 2004, la Société Royale du Royaume-Uni a reconnu les graves risques de nano toxicité, et a conseillé que « les ingrédients sous forme de nanoparticules devraient faire l'objet d'une évaluation d'innocuité de la part d'un

organisme scientifique consultatif avant d'être autorisés dans les produits » (Miller et Kinnear, 2008). Ce n'est qu'après dix ans que le Parlement européen a rejeté le projet de Règlement proposé par la Commission européenne qui visait à restreindre l'obligation d'étiquetage nano dans l'alimentation prévu fin 2014 (Gâteau, 2013). Selon la commission, on ne peut pas qualifier un ingrédient de « nano » que s'il contient 50% et plus de nanoparticules. Ce seuil est considéré beaucoup trop élevé par le Parlement européen. De son côté l'autorité européenne de sécurité des aliments (EFSA) a appelé à un seuil de 10% en raison de l'incertitude actuelle sur la sécurité liée aux nanotechnologies (Lacour, 2016). Stéphanie Lacour, directrice de recherche au CNRS à l'Institut des Sciences sociales du Politique à l'ENS Cachan ajoute que: «l'étiquetage des produits contenant des nanomatériaux apparaît, dans les discours des autorités publiques françaises et européennes ainsi que dans les demandes formulées par les parties prenantes, comme une piste à privilégier, à court terme, pour réguler le développement des nanotechnologies» (Lacour, 2016). Nous allons développer ces questions dans le chapitre V.

De nombreux travaux étudient les propriétés toxicologiques des nanomatériaux (Genaidy *et al.* 2009; Johnston *et al.*, 2010; Savolainen *et al.*, 2010; Iavicoli *et al.*, 2011), mais la majorité des expériences sont faites chez les animaux, en particulier chez le rongeur, dont les poumons sont beaucoup plus réactifs que ceux de l'être humain, avec des doses beaucoup plus importantes que celles auxquelles l'être humain est exposé (Gruère, 2012). En 2002, Pekkanen et ses collègues ont mis en évidence une corrélation entre le taux de nanoparticules inhalées et une altération du rythme cardiaque ainsi que du diamètre artériel. Une autre étude menée sur des humains volontaires asthmatiques qui ont inhalé des nanotubes de carbone indique un accroissement de l'inflammation de l'épithélium pulmonaire, une vasoconstriction pulmonaire et apparition d'une hyperactivité bronchique, ainsi qu'une chute du taux de leucocytes (Frampton *et al.* 2006).

Plus récemment, une étude *in vitro* réalisée par Huang et al., (2015) sur les souris. Ils ont choisi comme particules modèles des billes de polystyrène modifiées par un carboxyle marqué de manière fluorescente avec des diamètres de 20, 40, 100, 200 et 500 nm. *In vitro*, la cellule de trophoblastes (3A-Sub-E) ou la culture primaire de trophoblastes à terme a été utilisée pour l'analyse de l'absorption des nanoparticules à l'aide de cytométrie en flux, de microscopie confocale, de dosage de prolifération de BrdU et d'analyse de l'apoptose cellulaire à l'aide de Western Blot. L'injection intraveineuse de nanoparticules chez la souris enceinte au jour embryonnaire 17 a été utilisée pour étudier si les nanoparticules peuvent traverser le placenta. Les placentas de souris ont été recueillis et analysés quantitativement en utilisant une chromatographie liquide haute performance pour l'absorption de nanoparticules. Les auteurs ont remarqué que des particules de polystyrène fluorescentes ayant des diamètres allant jusqu'à 500 nm ont été absorbées par le placenta et ont pu traverser la barrière placentaire. Les particules de polystyrène fluorescentes ont été observées dans divers organes des fœtus après 4 h d'administration à des souris enceintes. L'absorption des nanoparticules par le tissu placentaire a été significativement augmentée dans les nanoparticules avec un diamètre de 40 nm. Aucune association linéaire n'a été observée entre la taille des nanoparticules et l'absorption. Les nanoparticules avec des diamètres de 20 nm (200 µg / ml) et 40 nm (500 µg / ml) pourraient induire une apoptose des cellules trophoblastiques avec une caspase 3 clivée et une prolifération cellulaire réduite. Ces résultats suggèrent que les nanoparticules peuvent traverser le placenta et être absorbées par les organes fœtaux. Certaines concentrations de nanoparticules de polystyrène modifiées par un carboxylate peuvent être cytotoxiques pour les trophoblastes, ce qui pourrait altérer la fonction placentaire.

En raison de leur taille, les nanoparticules, contrairement aux particules à l'échelle macroscopique, peuvent «franchir nos différents mécanismes de défense et être transportées sous forme insoluble dans l'organisme» (IRSST, 2006: 8). Ainsi, elles

peuvent traverser les membranes biologiques et pénétrer dans les cellules, tissus et organes (ibid). Comme l'a déjà démontré Park *et al.*, (2011) quand ils ont étudié les effets des nanoparticules d'argent de différentes tailles (20, 80, 113 nm), les nanoparticules d'argent ont induit des effets dans tous les points d'évaluation étudiés, mais les effets sur l'activité métabolique cellulaire et les dommages à la membrane ont été les plus prononcés. Par contre, les nanoparticules d'argent de 20 nm étaient plus toxiques et plus cytotoxiques que les nanoparticules plus grandes, elles ont même la capacité d'infliger des lésions cellulaires. En outre, la puissance de l'argent sous forme de nanoparticules pour induire des dommages cellulaires par rapport aux ions d'argent dépend du type de cellule et de la taille.

Selon le rapport Nanomaterials, Sunscreens and Cosmetics: Small Ingredients, Big Risk, de l'ONG Les Amis de la terre⁵ (Australie) des recherches scientifiques préliminaires (Peltier *et al.*, 2013; Faria *et al.*, 2014; Liu *et al.*, 2016) ont mis en évidence que « de nombreux types de nanoparticules peuvent être toxiques pour les cultures de cellules et de tissus humains, provoquant l'accroissement du stress oxydatif, la production de cytokines inflammatoires, la mutation de l'ADN et même la mort des cellules ». Faria *et al.*, (2014) ont examiné «sublethal oxidative stress effects of aqueous exposure to three different types of NM-TiO₂ differing in their coating or crystal structure but of similar primary size (20 nm) plus a micron-sized bulk material to zebrafish embryos without and with SSR. Oxidative stress responses of known model prooxidant (tert-Butyl hydroperoxide) and photoprooxidant (fluoranthene) compounds were also studied» (Faria *et al.*, 2014).

Les résultats ont montré une faible biodisponibilité du NM-TiO₂ aux embryons ayant des effets néfastes sur la croissance à 1 mg ml⁻¹. La phototoxicité a augmenté modérément, de 3 et 1,5 fois, sous co-exposition au fluoranthène (100 µg l⁻¹) et au

⁵ Organisation non gouvernementale (ONG) de protection de l'Homme et de l'environnement créée en 1969. <http://www.foei.org/fr/groupe-membres/asie-pacifique/australie>

NM-TiO₂ P25 (1 mg ml⁻¹), respectivement, inchangé dans les autres agrégats de TiO₂. Les expositions *in vitro* sous le rayonnement solaire simulé (SSR) ont confirmé que le NM-TiO₂ P25 avait le potentiel le plus élevé pour générer des espèces réactives d'oxygène (ROS). Les activités enzymatiques antioxydantes du superoxyde dismutase ont augmenté peu après l'exposition aux matériaux étudiés, alors que les taux de glutathion ont tendance à être modifiés après des expositions plus longues. Tous les composés ont pu produire un stress oxydatif améliorant le pigment de la β galactosidase associé à la sénescence (SA- β -gal). Sous le SSR, le NM-TiO₂ P25 a affecté les réactions antioxydantes et de stress oxydatif en tant que fluoranthène à base de phototoxicité. Ces résultats ont indiqué que malgré la faible biodisponibilité du NM-TiO₂ aux embryons de poissons-zèbres, P25 était phototoxique en raison de la production d'espèces d'oxygène réactives. Diverses études ont montré que certaines nanoparticules ont des effets cancérogènes (Donaldson, 2001), comme le souligne Toma (2013)

Trois types de nanoparticules de dioxyde de titane et trois types de nanotubes de carbone ont alors été observés. Ce n'est pas un choix quelconque: ces substances avaient déjà été soupçonnées de toxicité et le dioxyde de titane avait été classé comme substance cancérogène dès 2006 par le Centre International de Recherche sur le Cancer (Toma, 2013, s.p.).

En 2008, Gatti a étudié les tissus coliques pathologiques avec une technique de microscopie électronique par balayage environnemental pour vérifier la présence de polluants inorganiques, non biodégradables, c'est-à-dire micro et nano-débris d'origine exogène, après la découverte de débris dans le foie et les reins des souris. Au total, 18 échantillons de tissus du côlon affectés par le cancer et la maladie de Crohn ont été évalués et ont été trouvés dans tous les cas pour contenir des micros et des nanoparticules. Leur chimie, détectée avec une microsonde à rayons X, a indiqué une nature hétérogène, alors que la taille des particules était homogène. Trois échantillons témoins de cadavres sains et jeunes ont été analysés et ont montré

l'absence de débris dans la muqueuse normale et saine du côlon. L'étude révèle la présence de débris particuliers, généralement considérés comme biocompatibles, dans des échantillons pathologiques du côlon humain. Les résultats suggèrent un lien possible entre la présence de ces particules et la pathologie sous-jacente dans les cas analysés.

Une autre étude réalisée par Magaye et al., (2014), les nanoparticules de nickel métallique peuvent présenter un potentiel cancérigène plus élevé, ce qui suggère que des mesures de précaution devraient être prises dans l'utilisation de nanoparticules de nickel ou de ses composés en nanomédecine. Bien que pour des raisons évidentes, les études sur l'être humain soient rares, et que la connaissance de l'impact des nanotechnologies sur la santé humaine reste très limitée, néanmoins les recherches menées sur des modèles animaux indiquent des risques préoccupants.

L'évolution de la nanotechnologie soulève également la question de la contamination environnementale accidentelle due à la libération de composés à l'échelle nanométrique pendant le processus de dégradation. Chaudhry *et al.*, (2008) cité dans (Souza, 2016) soulignent qu'il est difficile de prédire si les nanocomposés se bioaccumulent dans la chaîne alimentaire, d'où ils représenteraient une source de contamination environnementale. Par conséquent, les tests d'écotoxicité sont nécessaires pour déterminer les risques que les nanotechnologies posent à l'environnement (Cushen *et al.*, 2012). Selon Perreault, (2012), l'utilisation des nanoparticules métalliques entraîne un risque de contamination de l'environnement qui est difficile à évaluer en raison du manque de connaissance toxicologique sur les nanoparticules. Des tests d'écotoxicité ont été effectués au cours des dernières années (tableau I.1), principalement avec des nanomatériaux déjà appliqués dans certaines industries (textiles, électroniques, pharmaceutiques, cosmétiques, etc.), telles que les nanoparticules d'oxyde métallique, les fullerènes, les métaux et nanotubes de carbone.

Tableau I.1: Preuves expérimentales de l'écotoxicité de nanomatériaux actuellement commercialisés

	Nanomaterial	Current applications areas	Analysis	References
ENM Identification tests	Single-walled carbon nanotubes (SWCNTs)	Electronic, lithium-ion batteries, textiles, chemical sensors, structural composites	Near-Infrared Fluorescence Spectroscopy (NIRF)	Parks et al. (2013)
	C ₆₀ fullerenes	Medical, cosmetic, surface coating, non-linear optic	Dynamic laser scatter (DLS) Zetasizer nano	Johansen et al. (2008)
	Silver nanoparticles	Antimicrobial appliance (pharmaceutical and cosmetic)	Inductively coupled plasma–mass spectrometry (ICP-MS)	Das et al. (2012)
Ecotoxicity Tests	SWCNTs	Electronic, lithium-ion batteries, textiles, chemical sensors, structural composites	Sediment toxicity test—static toxicity test with <i>A. bahia</i> (mysid) and <i>A. abdita</i> (amphipod)	Parks et al., 2013
	C60 fullerenes	Medical, cosmetic, surface coating, non-linear optic	Substrate-induced respiration Enumeration of protozoa—Most-Probable Number (MPN) and Colony Forming Unit (CFU)	Johansen et al., 2008
	Silver nanoparticles	Antimicrobial appliance (pharmaceutical and cosmetic).	Exposure experiment—monitored bacterial activity response	Das et al. (2012)
	TiO ₂ , ZrO ₂ , Al ₂ O ₃ , CeO ₂ , SWCNTs, fullerene	Cosmetics, paints, electronic, pharmaceutical, etc.	Microtox Test (bacteria), Pulse-amplitude modulation—PAM test (algae)	Velzeboer, Hendriks, Ragas, and Meent (2008)

Source: (Souza 2016, s.p.)

L'histoire est truffée d'exemples de sérieux problèmes sanitaires et environnementaux découlant de l'incapacité de réagir aux signes d'alertes précoces sur des matières perçues auparavant comme « étonnantes », du genre CFC, DDT⁶ ou amiante (Miller et Kinnear, 2008). Cela suggère que nous devrions prendre très au sérieux les signes d'alertes précoces associées à la toxicité des nanoparticules. Comme la sonnette d'alarme sur les nanomatériaux tirée aujourd'hui par l'agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentaire, de l'environnement et du travail (Anses), dont l'avis affirme que certains nanomatériaux sont toxiques pour l'être humain (voir I.2) et appelle à la mise en place urgente d'un encadrement réglementaire renforcé au niveau européen (Jadot et Kiil-Nielsen, 2014; Anses, 2015).

I.2.1 Enjeux économiques

Selon Lafontaine, Professeure titulaire en Sociologie, Sorbonne-Paris et Université de Montréal et membre de la Commission de l'éthique en science et en technologie (CEST) (2010), l'admiration et l'attrait que soulèvent les nanotechnologies, partout dans le monde, sont étroitement liés au potentiel économique énorme qu'on leur attribue (Lafontaine, 2010). Les nouveautés dans le domaine des nanotechnologies ont déjà permis l'émergence d'une industrie de plusieurs milliards de dollars (Aitken *et al.*, 2006, Greco *et al.*, 2015). Et cela dans les domaines de l'industrie automobile, aéronautique et spatiale, de l'électronique, de la pharmaceutique et des biotechnologies, de l'énergie et de l'environnement (Browaeys, 2009). En 2004, WinterGreen Research a réalisé une étude prétendant que les produits nano avaient créé un marché de 499 millions de dollars en 2003 aux États-Unis. Cette même firme

⁶ Comme le livre « Printemps silencieux » de Rachel Carlson, qui a sonné l'alarme sur l'utilisation des pesticides et le DDT en particulier.

prévoyait que le marché allait atteindre 4,5 milliards de dollars en 2009. Certains auteurs estimaient, en 2005, que les États-Unis étaient l'un des principaux producteurs dans le domaine des nanotechnologies, alors que l'Union européenne comptait pour environ 30 pour cent de ce marché mondial (Aitken *et al.*, 2006; et Chaudhry *et al.*, 2005). Roco et Bainbridge (2001), prétendaient que « le poids sur le marché mondial pourrait atteindre 1 trillion de dollars US d'ici 2015 et employer alors près de 2 millions de personnes » (FAO/OMS, 2011). Il faut bien noter qu'on connaît mal les bases sur lesquelles s'appuient ces estimations souvent très divergentes d'une firme à l'autre et d'un auteur à l'autre (Vandelac, 2015).

De nombreuses industries profitent des divers usages possibles des nanotechnologies. Les chercheurs et les concepteurs au sein de nombreuses entités industrielles se consacrent à améliorer la nanotechnologie dans le but d'obtenir un produit de meilleure qualité (plus forts, plus légers, plus durables, plus résistants à la corrosion), compétitif, inusable, inaltérable et avantageux (Lafontaine, 2010). Décrites comme innovations industrielles, ces nouvelles techniques sont l'objet d'une concurrence internationale encourageant les inventions industrielles et le commerce de la recherche scientifique au désavantage de l'inventivité (op. cit.). Selon Arnaud S, chercheur en pharmacie:

Il est assez fréquent de voir des chercheurs universitaires qui sont tellement liés à l'industrie que leurs recherches, au niveau de la créativité, sont relativement faibles. C'est un type de recherche qui a une application immédiate, mais à long terme n'amènera pas de grands changements ou de grandes révolutions (Lafontaine, 2010).

Cela représente non seulement une menace pour l'université, mais aussi un danger pour la science elle-même.

1.2.2 Enjeux sociaux

La société dans laquelle se développent les nanosciences et les nanotechnologies est déjà sensibilisée aux problèmes générés par certaines innovations technologiques et par certains choix scientifiques (Papilloud, 2010). Nombreux sont les exemples de crises dues à des accidents comme le nucléaire, qui a été considéré comme une technologie propre et bon marché alors qu'elle peut mettre gravement en danger la vie humaine, comme en a témoigné la catastrophe de Tchernobyl de 1986 (op. cit.) et ensuite celle de Fukushima. D'autres problèmes comme les OGM et à une autre échelle le réchauffement climatique, ont soulevé trois exigences rajoute Papilloud:

1. La transparence: qui conditionne la confiance que le public accorde à la science et à la technologie. Les sociétés ne tolèrent plus la dissimulation de l'information, et exigent que des experts divulguent les informations dont ils disposent lorsqu'elles peuvent avoir un impact sur la santé ou l'environnement.
2. La responsabilité: Les chercheurs sont responsables devant les citoyens et la société en général et sont obligés de rendre des comptes et d'exposer les résultats de leurs recherches dans un langage clair et accessible.
3. La gouvernance: selon Papilloud (2010), « le risque intervient au coeur des débats sur les nanotechnologies. Il structure le discours des experts et leur positionnement les uns vis-à-vis des autres sur la base d'une perspective commune: organiser la gouvernance des nanotechnologies et favoriser l'implication de la société civile». Il est indispensable d'imposer la concertation entre les décideurs et le public en amont de la recherche-développement (op. cit.).

Dans le cas des nanosciences et nanotechnologies, ces trois exigences s'imposent avec plus de force encore. Papillou (2010) ajoute que «Ces technologies de

l'infiniment petit sont des techniques invasives et invisibles, qui éveillent par conséquent vigilance, voire inquiétude, ou même soupçon». Elles concernent tout le monde dans la vie quotidienne: vie privée, santé et sécurité collective (CNRS, 2006).

I.3 Les nanotechnologies dans le secteur agroalimentaire

À la fin du XX^e siècle, la production agricole a connu un accroissement très important à l'échelle mondiale. Les développements technologiques jouent un rôle majeur dans la transformation du secteur de l'agriculture, passant d'une agriculture traditionnelle à une agriculture industrialisée (CEST, 2011). L'industrie agroalimentaire, définie, selon Alliance pour l'innovation en agroalimentaire (2007), comme «l'ensemble des activités économiques reliées essentiellement à la production, à la transformation, à l'exploitation et au conditionnement des produits agricoles destinés à l'alimentation humaine et animale» représente aujourd'hui un des plus importants acteurs économiques de la planète (CEST, 2011).

À l'instar d'autres secteurs, l'industrie agroalimentaire s'est intéressée à l'utilisation des nanotechnologies pour le développement des produits. On prétendait ainsi contribuer à assurer une meilleure qualité des produits, ajouter et améliorer les propriétés fonctionnelles, perfectionner les caractéristiques sensorielles et des processus de fabrication, tout en réduisant l'impact sur l'environnement, et tout en augmentant la productivité (Chaudhry *et al.*, 2008; Cushen *et al.*, 2012).

Un inventaire de 2009⁷, réalisé sur la base de déclarations volontaires et sous-estimant nettement ce champ, estimait néanmoins à plus de 800, le nombre de produits de consommation issus des nanotechnologies disponibles dans le monde, et

⁷ Woodrow Wilson International Center for School, PEN: The Project on Emerging Nanotechnologies (Etats-Unis): <http://www.nanotechproject.org/>

suggérait alors que dix pour cent d'entre eux étaient des aliments, des boissons et des emballages alimentaires.

Selon son inventaire de 2011, ce même institut recensait «1 371 produits dans le monde, dont 367 en Europe. Près d'un sur dix concernait le secteur alimentaire» (Bolis, 2013). Au cours des dernières années, estime un document de la FAO et de l'OMS de 2011, les applications et les produits dérivés des nanotechnologies se sont multipliés et devraient croître rapidement compte tenu de l'énorme potentiel de ces nouvelles technologies à répondre à de nombreux intérêts de l'industrie.

Comme toute autre industrie, le secteur de l'alimentation évolue grâce à l'innovation, la concurrence et la rentabilité. Elle est toujours à la recherche de nouvelles technologies pour améliorer «le goût, la saveur et la texture de ses produits, prolonger la durée de vie et améliorer la sécurité et la traçabilité» (FAO/OMS, 2011), mais aussi pour augmenter les parts de marché.

Certaines contraintes engendrées, particulièrement, par la dimension que les consommateurs accordent à leur santé et aux stricts respects des normes légales en vigueur, ont également incité l'industrie, selon les experts de l'FAO et l'OMS (2011) à:

Rechercher de nouvelles façons pour réduire les quantités de sucre, de sel, de colorants artificiels, de graisse et d'agents de conservation dans ses produits, et à réagir face à certaines maladies liées à l'alimentation comme l'hypertension artérielle, l'obésité, les maladies cardiovasculaires, le diabète, les troubles digestifs, certains types de cancer (comme le cancer des intestins) et les allergies alimentaires (FAO/OMS, 2011, p. 4).

Les influences aussi bien de la société que des techniques modernes ont contribué à la croissance de l'industrie alimentaire, comme «la nécessité de contrôler les pathogènes et certains dioxydes dans les aliments, de réduire la quantité d'emballages et de

déchets alimentaires, et de réduire l'empreinte écologique du cycle de vie des produits et des processus alimentaires» (FAO/OMS, 2011). Toutefois, dans ces deux cas, seule une analyse rigoureuse de l'évolution des faits, permettrait de confirmer ou d'infirmer si ces intentions affichées correspondent bien à l'évolution des pratiques, évoquées par certains organismes de l'ONU.

Selon Miller et Kinnear (2008), les préoccupations concernant l'utilisation de la nanotechnologie dans l'agriculture et la production alimentaire se rapportent à la poursuite de l'automatisation de la production alimentaire et aux nouveaux risques de toxicité grave pour l'être humain et l'environnement. Certains soulèvent également les risques de la nanosurveillance⁸ suivant chaque étape de la chaîne alimentaire puissent porter atteinte à la vie privée (Miller et Kinnear, 2008). L'incapacité des gouvernements à adopter des lois pour protéger le public et l'environnement contre les risques de la nanotechnologie est une autre préoccupation majeure (op. cit.).

L'utilisation de la nanotechnologie dans l'industrie agroalimentaire touche ses différents secteurs, production agricole; transformation des aliments; distribution des aliments; et consommation (CEST, 2011). On peut résumer ces applications dans le tableau I.2.

⁸ Suivre le mouvement des denrées alimentaires depuis le champ, à l'usine, du supermarché jusqu'à notre assiette.

Tableau I.2: Secteurs, applications et fonctions développés dans le secteur nanoalimentaire

Sector/Application	Function
Agriculture	<ul style="list-style-type: none"> -New transgenesis techniques Creation of new life forms based on the conception of new nucleotides -Improvement of germination rates following nanoparticle application -“Protection” and controlled release of active substances -Fields and herds dubbed “intelligent” -Treatment and analysis of biological material such as DNA, proteins, or sperm cells in minute quantities -New delivery systems for pharmaceutical substances for veterinary treatment -Transgenic plants engineered for soil mineral extraction -Treatment of wastewater as well as soil and agricultural waste -Contamination detection and quality analysis food -Improvement of taste, color, flavor, texture, consistency, etc. -Integration of silver nanoparticles (and others) for their antimicrobial properties -Improvement of mechanical properties (rigidity, strength, flexibility, durability) and barrier properties (temperature, humidity, light, oxygen and other gasses)
Nanobiotechnology Synthetic DNA	
Germination	
Nanofertilizers and Nanopesticides	
Nanocaptors	
Nanofluidic	
Nanomedicine	
Nanoculture	
Nanofilters	
Food Transformation	
Nanocaptors	
Nanostructured	
Biocide surfaces	
Nanopackaging	
Improved nanopackaging	

Tableau I.2 (suite) Secteurs, applications et fonctions développés dans le nanoalimentaire

Sector/Application	Function
Active nanopackaging	-Intelligent systems where an intentional substance transfers between the packaging and the contents actively improves or maintains product quality with the goal of prolonging shelf life.
Biocidal nanopackaging	-Reduction or prevention of microbial growth enabled by nanoparticle presence
Intelligent nanopackaging	-Inclusion of nanometric captors capable of measuring certain transport and storage conditions of food
Biodegradable or edible Nanopackaging	-Packaging made from polymers and natural nanocomposites
Consumption	-Increase in absorption and bioavailability of nutrients, health supplements, nutraceuticals (e.g., cooking oil), and active ingredients
Nanocuticals	-Prevention or reduction of microbial growth
Surfaces biocides	

Source: ETC Group, Down on the Farm: The Impact of Nano-Scale Technologies on Food and Agriculture. Ottawa: ETC Group, 68 p., 2004; Joseph, T. and M. Morrison, Nanoforum Report: Nanotechnology in Agriculture and Food. (Glasgow, UK): European Nanotechnology Gateway, 14 p., 2006; Chaudhry, Q. et al., Food Addit. Contam. Part A Chem. Anal. Control. Expo. Risk Assess., 25, 241, 2008; Chaudhry, Q., R. Watkins and L. Castle, Nanotechnologies in the food arena: new opportunities, new questions, new concerns. In Nanotechnologies in Food, Q. Chaudhry, L. Castle and R. Watkins (eds.), Cambridge: RSC Nanoscience and Nanotechnology, no. 14, pp. 1–17, 2010, Reproduced by permission of The Royal Society of Chemistry; FOE (Friends of the Earth) Australia, Out of the Laboratory and on to Our Plates: Nanotechnology in Food and Agriculture. Cam Walker (Melbourne): FOE Australia, 62 p., 2008; Imran, M. et al., Crit. Rev. Food Sci. Nutr., 50, 799, 2010; Smolander, M. and Q. Chaudhry, Nanotechnologies in food packaging. In Nanotechnologies in Food, Q. Chaudhry, L. Castle and R. Watkins (eds.), pp. 86–101. Cambridge: RSC Nanoscience and Nanotechnology, no. 14, 2010, Reproduced by permission of The Royal Society of Chemistry; CEST

(Commission de L'éthique en Science et en Technologie), Enjeux Ethiques des Nanotechnologies dans le Secteur Agroalimentaire: Supplément 2011 à L'avis Éthique et Nanotechnologies: Se Donner les Moyens D'agir. Quebec: Government of Quebec, 72 p., 2011 cités dans Beaudoin, Vandelac et Papilloud, 2013).

I.4 Risques sanitaires et environnementaux des nanotechnologies utilisées dans le secteur de l'agroalimentaire

Les nanomatériaux sont porteurs de risques associés à leur manipulation ou à leurs rejets dans l'eau, l'air et le sol. Par ailleurs, ces risques sont appelés à évoluer au cours du cycle de vie des produits dans lesquels on les retrouve, ce qui doit être pris en compte afin de protéger la biodiversité, la population et les personnes travaillant à leur production ou à leur contact (Beaudoin, 2016).

Les scientifiques, les ONG et les instances de régulation publiques expriment leurs préoccupations sur l'élimination dans l'environnement de déchets contenant des nanoparticules et de leurs impacts sur la santé (Vinck, 2009). Selon (Tchangna, 2008):

Même si les nanotechnologies représentent un enjeu considérable sur le plan économique et social et des bénéfices attendus notamment en matière de santé et de protection de l'environnement, l'émergence de ces technologies soulève des interrogations fondées quant à leur impact sur la santé (Tchangna, 2008, p. 10).

Les nanoparticules attirent fortement l'attention aujourd'hui en raison des risques potentiels de toxicité qu'elles présentent (ASP, 2010). Ces risques seraient associés à leur petite taille et à leur réactivité de surface (Ministère de l'Écologie et du Développement Durable, 2006). En effet, de taille infime, les nanoparticules peuvent pénétrer des cellules vivantes et s'accumuler dans les organes, comme nous l'avons

déjà souligné. De plus, des éléments toxiques pourraient s'y attacher (ASP, 2010). En outre, les nanoparticules peuvent se déplacer plus facilement à l'intérieur de l'organisme et être plus réactives (Vink, 2009; Greco *et al.*, 2014). Selon Mercier *et al* (2016):

L'évaluation des conséquences d'une exposition chronique chez l'homme constitue un enjeu de santé publique. La voie orale reste peu explorée alors qu'une fraction nanodimensionnée de particules se retrouve dans certains additifs/compléments alimentaires ou incorporés à des emballages au contact des aliments. Une fois ingérées, les nanoparticules sont susceptibles de transiter dans le tractus digestif, de subir des transformations, d'impacter elles-mêmes l'environnement luminal avant de franchir éventuellement la barrière épithéliale et se distribuer au compartiment systémique (Mercier *et al*, 2016, s.p.).

En réalité, les chercheurs n'ont toujours pas une connaissance suffisante de ces impacts potentiels. Ces risques étant associés à la fois à la taille, à la forme des nanoparticules et à la composition chimique, le travail d'évaluation de ces risques est colossal. Il y a lieu d'encourager les investigations en toxicologie et en écotoxicologie, de mettre au point des outils de reconnaissance et d'évaluation appropriés permettant la mise en place du principe de précaution (Vink, 2009; Souza *et al.*, 2016).

De plus, une meilleure compréhension de l'impact des nanoparticules manufacturées sur la santé humaine et l'environnement est essentielle pour le développement responsable des nanotechnologies (CNRS, 2008). L'Agence européenne de sécurité des aliments (AESA), (2011), souligne également qu'il «est essentiel de caractériser les nanomatériaux manufacturés de façon adéquate, selon les pratiques traditionnelles d'évaluation des risques». Pour L'ASP (2010), «Des données sont aussi nécessaires afin d'évaluer l'interaction des nanoparticules avec les autres nutriments dans le tube digestif, leurs taux d'absorption, leur biodisponibilité ainsi que leurs effets sur les

cellules épithéliales de l'intestin, ou sur la microflore de ce dernier». Déjà en 2007, le Comité Scientifique des Risques Sanitaires Émergents et Nouveaux a suggéré:

Qu'une attention particulière soit portée sur le fait que le passage de nanoparticules au travers des membranes cellulaires pourrait avoir un effet négatif sur l'organisme, notamment au sein du système cardiovasculaire ou encore par le passage de la barrière entre le sang et le cerveau (CSRSSEN, 2007, p. 23).

Selon Nowack *et al*, (2012), cité dans Souza *et al*, le risque associé à l'exposition aux nanomatériaux sera déterminé en partie par les processus qui contrôlent leur devenir et leur transformation environnementaux. Plusieurs modifications peuvent se produire dans les produits (p. Ex. Matériaux d'emballage ou produits contenant des nanoparticules) après leur élimination: transformation photochimique, oxydation, réduction, dissolution, adsorption / désorption, combustion, biotransformation ou biodégradation et abrasion, ce qui peut conduire le matériau à avoir Un impact environnemental supérieur à celui des matériaux de départ. En outre, l'accumulation potentielle dans les organismes environnementaux (Silvestre *et al*, 2011; cité dans Souza *et al*, (2016)) est une autre question importante, car les microorganismes dans les sols et les sédiments peuvent également être vulnérables aux effets de l'exposition aux nanomatériaux.

Le principal défi auquel nous sommes confrontés, précisent Nowack *et al*, (2012), Tourinho *et al*, (2012), Von der Kammer *et al*, (2012) et Parks *et al*, (2013), cités dans Souza *et al*, (2016), est de savoir comment évaluer les résultats actuels, car il n'existe pas de normes pour les tests de nanotoxicité. En outre, le comportement de ces matériaux dans le sol, l'eau et l'environnement et la manière dont leur mobilité et leur biodisponibilité dans les organismes (par exemple, les microorganismes du sol) peuvent être évalués est nécessaire. Par conséquent, les tests d'écotoxicité devraient tenter de reproduire le comportement réel des nanoparticules lorsqu'ils sont rejetés

dans l'environnement et des techniques plus robustes sont essentielles pour les caractériser (Souza et al, 2016).

I.5 Évaluation des risques sur la santé et l'environnement des nanotechnologies du secteur de l'agroalimentaire

Les applications des nanotechnologies dans le secteur agroalimentaire, comme dans la plupart des développements technoscientifiques, sont à la fois porteuses d'espoirs et de craintes. Si, quelques applications nanotechnologiques suscitent l'enthousiasme (CEST, 2011) les risques qui leur sont associés soulèvent en même temps d'importantes inquiétudes. La question du risque tend alors à occuper une place centrale dans les débats autour de ces applications technoscientifiques (op. cit.).

L'évaluation des risques se veut être une approche scientifique qui permet de caractériser un danger ainsi que tous les cas d'exposition à ce danger. Elle vise à estimer le risque et à comprendre les facteurs qui l'influencent. On peut évaluer les risques potentiels et réels d'un élément chimique, d'une activité ou d'une combinaison d'activités, des rejets, en mesurant et en comparant divers paramètres (FAO/OMS, 2011; Acrue environnement, 2015). Le travail toxicologique accompli jusqu'à présent répond principalement aux risques professionnels liés à la production et à la manipulation des nanomatériaux (Anses, 2014). Cependant, nous en savons beaucoup moins sur le comportement et le devenir des nanomatériaux dans l'organisme (FAO/OMS, 2011).

Selon le rapport de la FAO/OMS (2011), concernant l'évaluation des risques et de la sécurité:

Les industriels et les universitaires partagent le même intérêt, motivés par la sécurité et la confiance des consommateurs ainsi que le désir d'éviter des pertes au niveau des recettes du fait des risques réels ou perçus au sein d'un créneau commercial aux marges bénéficiaires étreintes et au volume d'activités élevé (FAO/OMS, 2011, p. 27).

Tout cela met en évidence plusieurs problèmes, à savoir:

Une augmentation probable de l'exposition du public et de l'environnement, une inquiétude documentée du public née de la reconnaissance des scientifiques du manque de données et de la disponibilité d'un nombre croissant de produits, un manque ressenti de transparence ou du moins, d'une certaine cohérence des communications des sociétés et une insatisfaction générale liée à la gouvernance globale et sociétale des nanotechnologies (ibid. p.28).

Selon l'Anses (2014), la progression des connaissances relatives aux risques associés à l'utilisation des nanoproduits s'est récemment accélérée suite aux efforts de recherche effectués et, en particulier, aux actions européennes consacrées à ce sujet. Cependant, selon toujours l'Anses (2014) :

En plus de se confronter à une somme importante de lacunes de connaissance à combler en matière d'évaluation des risques, la dynamique d'acquisition de ces données entre directement en compétition avec celle de l'évolution (procédés de fabrication, caractéristiques, usages, etc.) de ces nanoproduits sur le marché (Anses, 2014, p. 109).

Dans un tel contexte, de fortes incertitudes restent toujours quant à l'évaluation des risques associés à l'usage de ces produits nanotechnologiques (op. cit.). Comme le mentionne l'IRSST (2015) dans son rapport «Portrait de la nanotechnologie au Québec dans les milieux industriels et de la recherche universitaire et publique», que:

Dans un contexte où les incertitudes persistent sur les risques et sur la disponibilité de stratégies de maîtrise de l'exposition, il devient important

d'identifier les milieux de travail qui manipulent ces produits afin de pouvoir les soutenir efficacement en matière de prise en charge de la prévention des lésions professionnelles (IRSST, 2015, p. 3).

De ce fait, selon le rapport des experts de la FAO/OMS (2011):

les besoins et les façons de progresser pour éviter les risques pour la santé humaine aux niveaux international et national porteront sur les connaissances (scientifiques et données de marché), sur les moyens (financements des études, des installations et des chercheurs formés) et sur les mécanismes (collaboration internationale sur la caractérisation, conception de méthodes et de tests, collaboration internationale de plusieurs parties prenantes pour la rédaction de directives et l'harmonisation, participation du public et gouvernance sociétale) (FAO/OMS, 2011, p. 45).

Beaudoin (2016) affirme que «Les dispositifs d'évaluation prévus pour les nanomatériaux correspondants à des substances nouvelles ou visés par des avis de nouvelles activités ne conviennent pas à l'évaluation de leurs risques». Il ajoute que,

«Le discours selon lequel des méthodes d'évaluation devraient être développées pour tenter de mieux les adapter à la complexité des nanomatériaux n'a manifestement pas été réalisé comme prévu et n'a donc pu donner des résultats probants. Si bien qu'à partir des dispositifs réglementaires et évaluatifs prévalant actuellement au Canada, il s'est avéré pratiquement impossible d'identifier les nanomatériaux potentiellement nocifs et d'estimer leurs risques environnementaux et sanitaires» (Beaudoin, 2016, p. 345).

I.6 Conclusion du Chapitre I

La nanotechnologie a émergé comme un champ technologique susceptible de développer et de transformer l'ensemble du secteur agroalimentaire. Bien que

toujours un concept relativement nouveau, il existe des préoccupations concernant sa sécurité, sa réglementation et son acceptation par les consommateurs.

Au cours des dernières décennies, l'utilisation de la nanotechnologie dans l'industrie alimentaire a été axée sur le développement du matériel d'emballage. Les enjeux majeurs pour les entreprises en terme d'emballage sont: la sécurité (produit conforme, intégrité du produit), innocuité et préservation des aliments, allongement de la durée de vie des produits, productivité, acceptation sociale et réglementation (Bouchesne, 2008: 57). Les nanoparticules sont utilisées comme renforts pour améliorer, dit-on, la barrière et les propriétés mécaniques des polymères, ce qui se traduit par des emballages avec moins de demandes de matières premières. Cependant, cette nouvelle technologie pose des préoccupations en matière de toxicité. En outre les perceptions et donc l'acceptation des consommateurs pose problème, ce que nous examinerons dans le chapitre II. Nous allons aussi illustrer les approches théoriques et méthodologiques pour appréhender la question de l'utilisation des nanoparticules dans l'emballage alimentaire.

CHAPITRE II

ORIENTATIONS THÉORIQUES ET MÉTHODOLOGIQUES

Dans le présent chapitre, nous présentons les approches théoriques et méthodologiques suivies dans le cadre de cette recherche. La méthode de recherche exploratoire s'appuie essentiellement sur un travail systématique de revue et d'analyse de la littérature scientifique, gouvernementale et des organisations non gouvernementales préoccupées par cette problématique.

II.1 Approches théoriques et méthodologiques

Le développement spectaculaire de l'emballage, lié à l'évolution des modes de vie et de consommation et s'appuyant sur des technologies de pointe, s'accompagne de coûts croissants associés à l'après-usage, d'impacts sanitaires et environnementaux et de contestations en termes de gaspillage (Bertolini, 1995).

En raison des quantités considérables qu'ils représentent et de la forte pression sociale dont ils font l'objet, les emballages figurent, dans les politiques de gestion des déchets, parmi les flux prioritaires pour lesquels des instruments de régulation sont mis en place ; en particulier, les responsabilités respectives des acteurs ou maillons de la chaîne ont été redéfinies et de nouveaux dispositifs de financement ont été mis en place (op. cit.).

Ajoutant à la problématique citée ci-haut, l'utilisation des nanoparticules dans l'emballage pourrait, selon certains industriels et scientifiques, résoudre le problème des déchets d'emballage! Dans le présent mémoire, nous allons analyser le dossier des nanoparticules dans l'emballage alimentaire en mettant en évidence ses intérêts majeurs, ses limites et ses impacts ainsi que ses principaux acteurs.

Notre intérêt pour ce sujet est né lors des recherches menées sur les applications des nanotechnologies dans le secteur de l'agroalimentaire. Selon des recherches sur Internet touchant les nanoparticules et le danger potentiel qu'elles engendrent, sur la santé et l'environnement, il nous apparaît que le domaine des emballages alimentaires est un sérieux sujet d'inquiétudes; ce qui a suscité notre curiosité et notre intérêt à mieux cerner le domaine du nano-emballage.

Notre problématique crociera les trois enjeux suivants :

- 1) la santé: la problématique qui se présente pour la santé humaine de la présence des nanoparticules dans l'emballage alimentaire est leur toxicité potentielle. Quels effets sur la santé humaine les divers types de nanoparticules incorporées dans l'emballage alimentaire peuvent-ils avoir?
- 2) La société: quels sont les droits des citoyens d'être informés avec transparence des différentes nanoparticules intégrées aux emballages ? Ces emballages seront-ils étiquetés ? Quelle sera alors la liberté de choix des consommateurs ? Comment assurera-t-on l'acceptabilité sociale relative à la présence des nanoparticules dans l'emballage alimentaire ?
- 3) L'environnement: l'impact sur l'environnement des nano-emballages. Comment sont traités les déchets des nano-emballages? Quels sont leurs impacts sur l'environnement et sur la chaîne trophique ?

Étant donné que nous nous intéressons à l'évaluation des impacts sur l'environnement et la santé humaine des nanoemballages alimentaires, il nous

semble essentiel pour mieux comprendre ce dossier dans son ampleur, d'adopter une approche globale, interdisciplinaire et intégratrice, nous permettant de prendre en compte l'ensemble des niveaux d'analyses et des variables pertinentes.

Nous avons privilégié l'approche écosanté qui consiste à réunir les scientifiques, les décideurs et les citoyens pour travailler ensemble, en vue d'améliorer à la fois la santé humaine et la salubrité de l'environnement; approche dont nous nous sommes inspiré, mais, sans avoir pu réunir les conditions objectives d'un tel travail. Nous avons donc tenu compte de ces préoccupations dans nos travaux. Nous nous sommes également inspirés de l'approche cycle de vie, qui prend en considération les impacts générés à chaque étape du cycle de vie, depuis l'extraction des matières premières, jusqu'à la fin de vie d'un produit, en mettant la lumière sur les étapes où les impacts environnementaux sont les plus importants, tel que nous allons l'explicitier ci-après.

Nous allons aussi examiner les conceptions de développement durable afin de mettre en évidence dans quelle mesure l'introduction des nanoparticules dans l'emballage alimentaire peut être ou non compatible avec le développement durable.

II. 1.1 Approche écosanté.

La dégradation de l'environnement et les problèmes de santé prennent des proportions inquiétantes et s'aggravent sans cesse (les changements climatiques, la pollution, la dégradation des écosystèmes, les catastrophes naturelles et les menaces de pandémie, etc.) (Charron *et al.*, 2014). Hassan *et al* (2005) mentionnent que «d'autres crises mondiales, telles que les crises financières, qui frappent d'abord les plus pauvres, viennent encore exacerber la situation. Les écosystèmes se révèlent

incapables de fournir les services qu'on en attend» (Hassan *et al.*, 2005). Cette situation alarmante a fait naître un intérêt grandissant porté au développement durable, à la qualité de l'environnement et à l'amélioration de la santé humaine (Charron *et al.*, 2014). L'écosanté est un nouveau domaine de recherche, d'éducation et de pratique de plus en plus présent sur la scène internationale. C'est une approche basée sur la mise en évidence des relations étroites entre la santé des individus, des populations et des écosystèmes (Berge, 2013).

Initialement conçue par le Centre de recherche interdisciplinaire sur le bien-être, la santé, la société et l'environnement (CINBIOSE), largement diffusé et préconisé par le Centre de Recherche et de Développement International depuis 1996 (CRDI, 2011), l'Approche Écosanté est portée par le réseau international Ecohealth. Lebel (2003), dans le cadre de son doctorat et de certaines recherches menées au CINBIOSE et à l'Institut des Sciences de l'environnement (ISE) de l'UQAM; puis au Centre de recherche pour le développement international (CRDI), a contribué à systématiser et à diffuser l'approche écosanté (Beaudoin, 2008).

Selon le CRDI (2011) l'écosanté est un moyen novateur et efficace de produire de nouvelles connaissances qui aideront à mieux cerner les problématiques environnementales en tenant compte de la sécurité de l'environnement et de la santé humaine. Elle favorise des actions positives sur l'environnement visant à augmenter le bien-être et à améliorer la santé des communautés.

Selon Lebel (2003) «il y a des liens inextricables entre les humains et leur environnement biophysique, social et économique, et ces liens se répercutent sur la santé des individus». L'approche l'écosanté s'inscrit dans une démarche de développement durable, car elle accorde beaucoup d'importance à l'économie, à l'environnement et aux besoins sociaux et considère que ces trois dimensions ont toutes des impacts significatifs sur la santé des écosystèmes; elle favorise des

interventions positives sur l'environnement afin d'améliorer le bien-être et la santé des populations (Beaudoin, 2008).

Selon Vandelac (2006), même si les habitudes de vie des individus sont ciblées par la promotion de la santé, l'approche écosanté s'intéresse davantage aux principaux déterminants de la santé (écarts socio-économiques, conditions de travail, soins aux jeunes enfants, etc.) et à leurs interactions avec l'environnement tout en privilégiant les interventions, dès l'apparition de signes précoces voire même en amont, aux sources mêmes des problèmes de santé, notamment du côté des orientations économiques et des politiques publiques (op. cit.). Selon Lebel (2003), l'approche écosanté s'appuie sur trois piliers méthodologiques qui sont la transdisciplinarité, la participation et l'équité.

Pour le professeur Benjamin Fayomi, de l'unité de formation et de recherche de santé au travail et environnement dans une université du Bénin:

L'approche écosanté consiste à réunir des scientifiques, la communauté (les populations) et les décideurs pour qu'ils travaillent ensemble pour trouver des solutions afin d'améliorer la santé humaine en tenant compte de la sauvegarde d'un environnement sain et bénéfique à cette communauté (Coulibaly Zié, 2013, s.p.).

L'approche écosanté exige l'implication des communautés et des décideurs dans la recherche des problèmes et des solutions (Lebel, 2010), comme en témoignent certains projets menés en Amazonie brésilienne, comme le projet Caruso et PLUPH⁹, en Amazonie Brésilienne. L'approche écosanté, par rapport aux approches usuelles de santé publique et de santé environnementale, s'avère donc une contribution novatrice.

⁹ PLUPH ET CARUSO sont deux projets réalisés par les chercheurs de l'Université du Québec à Montréal, sous la direction du Professeur Marc Lucotte, en Amazonie brésilienne.

- Dans le domaine des nanotechnologies

Les nanotechnologies sont souvent présentées par les industriels et leurs gouvernements comme «un domaine plein de promesses, voué à l'amélioration des conditions de vie et au progrès technique» (Berge, 2013). L'utilisation des nanoparticules dans les emballages alimentaires présente certains avantages (emballage plus solide, mais léger, recyclable et fonctionnel, permettant d'améliorer la sûreté et la durée de conservation des denrées alimentaires) (FAO/OMS, 2011; Gustavo, 2011). Cependant, il importe d'examiner attentivement les risques qu'elles peuvent engendrer. Il serait donc essentiel que la participation des parties prenantes dans la prise des décisions sur les nanotechnologies soit clairement encouragée (FAO/OMS, 2011). Il est, aussi, important que la priorité des parties prenantes soit de veiller à ce que la recherche dans le domaine des nanomatériaux se penche sur leurs risques potentiels, en particulier dans le secteur de l'alimentation qui est un sujet délicat et l'un des plus sensibles dans le domaine des nanotechnologies (ibid.).

Dans le cas de l'emballage, la demande croissante pour une production durable, l'augmentation de la concurrence, la prise de conscience accrue de la protection de l'environnement et l'augmentation du taux de maladies d'origine alimentaire a amené l'industrie alimentaire à travers le monde à se concentrer sur le développement de nouveaux produits et procédés d'emballage alimentaire afin de répondre à la demande des consommateurs (Ramachandraiah *et al.*, 2014).

Par conséquent, une innovation comme la nanotechnologie peut avoir un impact significatif sur l'industrie de l'emballage alimentaire, vu leurs avantages potentiels, comme l'on a déjà signalé dans le chapitre I: biodisponibilité améliorée, effets antimicrobiens, acceptation sensorielle améliorée et distribution ciblée de composés

bioactifs. Cependant, des soucis existent dans l'application de nanomatériaux en raison des lacunes dans la production et les risques pour la santé causés par les mêmes propriétés qui offrent également les avantages (ibid.). Mais, comme dans tous les domaines de production, et en absence de cadre réglementaire approprié, c'est la logique économique et commerciale qui prédomine dans ce secteur.

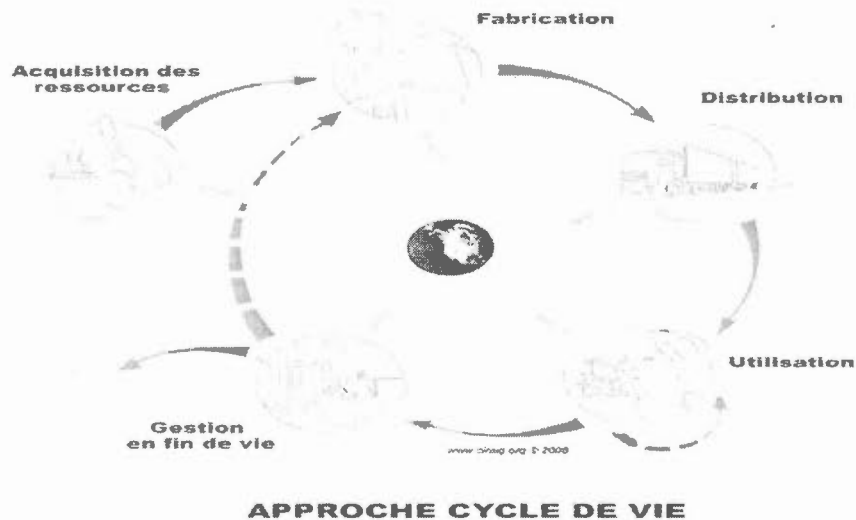
Les questions d'acceptation du public, d'économie et de régulation de nanomatériaux susceptibles de persister, d'accumuler et de conduire à la toxicité doivent donc être abordées. Jusqu'à présent, le secteur le plus prometteur pour l'application des nanotechnologies semble être celui de l'emballage, mais les effets sur la santé humaine et l'environnement en raison de la migration des nanomatériaux vers les denrées alimentaires doivent être davantage étudiés. L'avenir de ce secteur dépend des rôles joués par les gouvernements, les organismes de réglementation, les fabricants et les consommateurs qui sont appelés à travailler ensemble afin de permettre la mise en application concrète du concept de développement durable dans la fabrication des nano- emballages alimentaires.

C'est cette articulation fine des aspects politiques, économiques, sociaux et culturels qui font de l'approche écosanté une approche pertinente pour appréhender cette problématique.

II.1.2 Approche cycle de vie

Selon la Chaire Internationale sur le cycle de vie (CICV, 2009), «L'approche cycle de vie est une approche qui vise la prise en compte de toutes les relations sociales, économiques et environnementales propres à un produit ou à un service, et ce, tout au long de son cycle de vie». Le Centre Interuniversitaire de Référence sur l'Analyse, l'Interprétation et la Gestion du cycle de vie des produits, procédés et services

(CIRAIG, 2005), définit l'approche cycle de vie comme étant une approche axée sur toutes les étapes que traverse un produit, soit de l'extraction des matières premières jusqu'à son élimination finale.



Source: (Chaire Internationale sur le cycle de vie, 2012)

Offrant une vision globale, les décisions basées sur l'approche cycle de vie ont pour but d'éviter les transferts de problèmes d'une étape du cycle de vie à une autre (CICV, 2009). Le Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE, 2004) pense que «l'approche du cycle de vie couvre les possibilités et les risques liés à un produit ou à une technologie sur toute la chaîne qui va de l'extraction des matières premières à l'élimination du produit en fin de vie utile».

Dans son rapport de 2009 «Pourquoi l'approche cycle de vie? », le PNUE ajoute que «l'analyse du cycle de vie (ACV) est un outil privilégié pour recueillir des informations sur les impacts potentiels et réels du cycle de vie des produits». Car cette approche considère que chaque étape du cycle de vie d'un produit a un impact, sur l'économie, l'environnement et sur les humains (travailleurs, consommateurs,

communautés locales, la société et tous les acteurs de la chaîne de valeur) (CICV, 2009 ; PNUE, 2009).

Dans le concept «cycle de vie», tous les acteurs inclus dans la chaîne complète du cycle de vie d'un produit ont une part de responsabilité et un rôle à jouer en ce qui concerne les effets causés par ces produits (CIRAIG, 2005). Aussi, selon la même source, «appliquée à la conception de produits, aux procédés de production et comme soutien pour la prise de décision en matière de politiques environnementales, la pensée " cycle de vie" s'inscrit donc comme un élément essentiel», qui permet aux entreprises ou aux gouvernements d'opérer dans un contexte de développement (op. cit.).

Dans le cas des nanotechnologies, il est important de prendre en considération le cycle de vie dans l'évaluation des nanomatériaux manufacturés. Cela signifie, par exemple, que le devenir dans l'environnement doit être analysé afin d'évaluer l'exposition humaine à des aliments (FAO/OMS, 2011). Selon la même source,

L'examen des différentes étapes du cycle de vie dans le cadre d'une évaluation des risques permettra d'identifier et de classer les voies d'exposition et de repérer les changements d'attributs des nanomatériaux manufacturés aux différentes étapes et donc d'identifier le besoin d'une évaluation plus détaillée de cycles de vie précis (ibid, p. 43).

L'utilisation des nanomatériaux manufacturés dans les emballages alimentaires suscite une exposition directe aux nanoparticules des aliments emballés (Bolis, 2013; FAO/OMS, 2011). Une autre exposition humaine à partir des aliments pourrait survenir au moment de l'élimination de l'emballage dans un composteur et de la libération qui s'ensuit des nanoparticules dans le sol, entraînant une absorption par les produits végétaux (FAO/OMS, 2011: 43). L'intégration du cycle de vie permettra d'identifier les voies environnementales qui pourraient déboucher à une exposition au

travers de toute la chaîne alimentaire, ce qui facilite l'examen de l'exposition du producteur au consommateur (ibid.).

II.1.3 Le développement durable

La notion de développement durable fait partie du dictionnaire des idées reçues contemporaines. Elle est maintenant un élément omniprésent dans les discours et actions des acteurs impliqués dans les questions environnementales et de développement (Vivien, 2005). Ce concept est le résultat des préoccupations générales sur l'état et la durabilité des dimensions environnementales, économiques et sociales du monde d'aujourd'hui et de demain.

Il revient à la Commission mondiale sur l'environnement et le développement (CMED, 1988) d'avoir popularisé ce concept en le publiant dans le rapport Brundtland. Le développement durable vise à répondre «aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs» (Crawford, 2014, s.p.). Car la croissance économique risque fort de compromettre non seulement l'avenir des générations futures, mais l'avenir de nos propres générations (Balthazard, 2006).

Selon la Chaire de responsabilité sociale et de développement durable (2005), «le développement durable doit tenir compte des facteurs sociaux et écologiques aussi bien qu'économiques, de la base des ressources biotiques et non biotiques ainsi que des avantages et des inconvénients à court et à long terme des solutions de rechange». De tels concepts multidimensionnels visent à lier les trois dimensions économiques, sociales et environnementales.

Selon Nicola Lesca (2010), l'objectif de développement durable est de définir des schémas viables conciliant les trois principes fondamentaux suivants:

- Un principe économique, qui sous-tend une utilisation raisonnable des ressources financières, humaines et naturelles et qui assure aux personnes un standard de vie raisonnable, sans menacer pour autant l'avenir des générations futures.
- Un principe social, qui sous-tend que chaque individu doit être traité avec équité. Il porte ainsi sur les conséquences sociales de l'activité des entreprises.
- Un principe environnemental, qui sous-tend que les citoyens et les organisations doivent protéger les ressources naturelles. Il porte sur la recherche de compatibilité entre l'activité sociale et économique des entreprises et la conservation du milieu naturel, de la biodiversité et des écosystèmes.

Bien que le Sommet mondial pour le développement social de Copenhague, en 1995, ait souligné une importante dégradation de l'environnement et une aggravation de la pauvreté et des déséquilibres (Balthazard, 2006), les changements significatifs tardent encore. Balthazard (2006) rajoute :

Comment faire pour qu'au nom des grands principes, chacun prenne ses responsabilités ? On ne peut envisager l'avenir de notre planète alors que la majorité des habitants est confrontée à la faim et à la répression. Le droit du développement humain durable est un des objectifs prioritaires de l'esprit du développement durable (Balthazard, 2006, p.33).

Depuis la fin des années 1990, la société civile invite fortement les entreprises à prendre en considération dans l'équation des profits la réparation des impacts (sociaux ou environnementaux) associés à leurs activités, qu'ils soient directs ou indirects, qu'ils soient visibles à court terme ou à long terme (Weiland, 2009). Ce qui

incite les entreprises soucieuses de rentabilité économique à assumer davantage leurs responsabilités sociales et environnementales

II.1.4. L'interdisciplinarité

Au lendemain de Rio 92, la volonté «enthousiaste» des nations d'épouser le développement durable comme référentiel à l'élaboration des politiques globales ressuscitait ainsi l'apport des autres savoirs à l'identification, à la définition et à la résolution des préoccupations contemporaines et surtout environnementales (Dartiguepeyrou *et al.*, 2013).

Trop souvent, la recherche monodisciplinaire produit des connaissances incapables de tenir compte à la fois des dimensions biogéophysiques et à la fois des enjeux socio-économiques et politiques (Karpinski *et al.*, 1972). Cette appréhension des problématiques négligeant soit les fondements biogéophysiques, soit la diversité des interactions sociales, rencontre souvent des difficultés dans la mise en œuvre de stratégies alternatives (op.cit.).

D'une part, l'étude des problèmes environnementaux par les seules sciences biophysiques est souvent trop peu soucieuse d'examiner les origines économiques et sociales de ces problématiques qui est souvent une source de difficultés dans la mise en œuvre des pratiques soucieuses de bien commun.

D'autre part, les sciences humaines ont souvent besoin d'éclairages des sciences de la nature, de l'ingénieur, de la santé, etc. pour appuyer leurs analyses dans l'explication des problématiques et proposer des changements de politiques, de normes et de règlements ou encore au plan individuel des changements de comportement et de modes de vie visant à minimiser les risques de technologies susceptibles de causer des dommages sanitaires et environnementaux.

La recherche interdisciplinaire, qui de plus en plus est à l'ordre du jour, rassemble plusieurs spécialistes autour d'une problématique complexe pour en cerner toutes les dimensions et produire des connaissances scientifiques inédites (Bertrand *et al.*, 2002). Elle exige la collaboration de plusieurs «sous cultures», et draine plus de spécialistes que la recherche traditionnelle et nécessite par conséquent des ressources financières et matérielles adéquates (op. cit.).

L'approche écosanté implique une telle vision interdisciplinaire tant sur le plan de la recherche que de la pratique. Si l'hégémonie de l'économie et des technosciences sur les autres disciplines dans la quête du progrès pour tous n'était pas remise en cause, ces disciplines devront dorénavant apprendre à «jouer en équipes» sur des domaines qu'elles considéraient siens (Karpinski *et al.*, 1972). Pour Beck (2008), «beaucoup de problèmes qu'il serait (plus) facile de résoudre si on les traitait ensemble, de façon globale, sont quasiment insolubles si on les affronte seuls ». Voilà qui souligne la nécessité sinon l'obligation d'appréhender les questions environnementales actuelles sous l'angle de l'interdisciplinarité comme le souligne aussi Quesnel (1995).

Il faut noter des difficultés inhérentes à la composition des équipes de recherche comme le souligne Karpinski *et al.* (1972):

Ce sont les difficultés suscitées par les différences de valeurs, de langages et de techniques de recherche» propres à chaque sous-culture, qui justifient la raison d'être d'équipes interdisciplinaires et «il faut comprendre que chaque discipline en découpant la réalité à sa façon crée en même temps une certaine distorsion de cette réalité par les théories et les méthodes qu'elle utilise (op.cit, p.28).

Les échelles temporo-spatiales permettent de juger de la magnitude du phénomène à étudier. Si l'interdisciplinarité n'est pas une panacée et si l'intégration harmonieuse

des différents savoirs pose d'énormes défis, néanmoins ses apports vont bien au-delà de ceux de la recherche monodisciplinaire (Quesnel, 1995).

II.2. Objectifs

À partir d'une revue de littérature, dont nous préciserons ultérieurement les contours, ce mémoire vise à explorer le domaine de l'emballage alimentaire basé sur la nanotechnologie, ainsi que les types de nanoparticules incorporées dans ces emballages alimentaires et leurs impacts potentiels sur la santé et l'environnement. Ayant pour objectif de situer ces questions dans leur contexte global, ce mémoire examine également l'état du marché mondial de ce secteur, les firmes impliquées, les principaux acteurs et les enjeux majeurs.

II.3 Hypothèses

- La pénétration éventuelle des nanoparticules présentes dans les emballages alimentaires, peut présenter des risques pour la santé.
- Les nano-emballages, si on considère l'ensemble de leur cycle de vie, du processus de production jusqu'aux déchets produits, présentent des risques pour les écosystèmes et l'environnement.

II.4 Approches méthodologiques

Partant d'une revue de littérature scientifique, gouvernementale et grise, publiés entre 2006 et 2016, bien que certains articles du début 2017 aient également été pris en compte, nous avons exploré quels pourraient être les principaux risques découlant de

l'utilisation des nanoparticules dans les emballages alimentaires, pour la santé humaine et l'environnement. Lors de ces recherches menées sur les applications des nanotechnologies dans le domaine de l'agroalimentaire, le nano-emballage nous est apparu comme un sujet saillant dans le champ émergeant des nanotechnologies.

Comme nous le verrons par la suite, cette revue de littérature, s'est d'abord appuyée sur une première revue exploratoire pour rassembler l'information déjà disponible sur le sujet, afin de cerner l'étendue du sujet et des ressources disponibles et d'identifier les ouvrages les plus pertinents, ce qui nous a aidé à identifier des mots-clés, Anglais et Français, essentiels à la recherche documentaire, à savoir:

- Nanotechnology;
- Nanoparticle;
- Nanomaterial;
- Nanotechnology risk;
- Nano-migration;
- Nano-packaging and environment;
- Nano-packaging and health;
- Eco-health;
- Nanotechnology, regulation;
- Nano-packaging, legislation;
- Nano-packaging, Evaluation;
- Nano-food;
- Food packaging;
- Nano-packaging;
- Life cycle;
- Food industry;
- Nanotechnologies;
- Emballages alimentaires;

- Nano-emballages;
- Santé;
- Environnement;
- Éco-santé;
- Cycle de vie;
- Secteur agroalimentaire.

La recherche d'articles scientifiques (en sciences pures et naturelles ainsi qu'en sciences humaines et sociales) pour identifier des articles dans le domaine de la médecine et de la biologie sur les effets des nanoparticules utilisées dans l'emballage alimentaire (toxicité par exemple), a été réalisée dans les bases de données Medline Toxnet, Pubmed, Google Scholar, ScienceDirect, Scopus, Virtuose (bibliothèque UQÀM). Nous avons d'abord repéré plusieurs centaines d'articles scientifiques. Après l'examen des résumés, nous avons choisi environ une centaine d'articles selon les critères suivants pour en faire une analyse plus rigoureuse. Compte tenu de nos préoccupations pour la santé et l'environnement, nous avons retenu 30 articles sur la migration et la toxicité des nanoparticules incorporées dans l'emballage alimentaire, dont les plus pertinents sont:

- Bumbudsanpharoke, N., & Ko, S. (2015).
- Bott, J., Störmer, A., & Franz, R. (2014).
- Chaudhry et al, (2008).
- Cushen et al, (2012).
- Duncan, T. V., & Pillai, K. (2014).
- Deus et al, (2013).
- Esmailzadeh et al, (2016).
- Huang, J. Y., Li, X., & Zhou, W. (2015).
- Imran et al, (2010).
- Ramachandraiah et al, (2014).

- Sánchez et al (2014).
- Souza et al, (2016).
- Störmer et al, (2017).
- Silvestre et al, (2011).
- Wyser et al, (2016).

Pour identifier les acteurs du débat et ses principaux enjeux, nous avons certes tiré partie de la revue de littérature mentionnée plus haut et nous avons centré notre attention sur une vingtaine d'articles de revues et notamment des revues de:

- Nanotoxicology;
- Journal of Nanobiotechnology;
- International Journal of Nanomedicine.

Nous avons en outre analysé les volets nanotechnologies, et leurs relations avec les politiques publiques et l'économie de diverses instances gouvernementales en procédant à l'examen minutieux de leurs sites internet et des principaux documents publiés dans le domaine des nanotechnologies.

1. Des organisations internationales:

- L'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO)
- L'Organisation mondiale de la santé (OMS).
- L'Organisation de coopération et de développement économique (OCDE).
- La Commission mondiale sur l'environnement et le développement (CMED)

2. Des organisations nationales:

- Aux États-Unis:

- EPA: Environmental Protection Agency (États-Unis) ;

➤ En Europe:

- Commission Européenne. (2007). Commission Directive 2007/19/EC of 2 April 2007 amending Directive 2002/72/EC relating to plastic materials and articles intended to come into contact with food and Council Directive 85/572/EEC laying down the list of simulants to be used for testing migration of constituents of plastic materials and articles intended to come into contact with foodstuffs;
- Commission Européenne. (2010). *Towards A Strategic Nanotechnology Action Plan (SNAP) 2010-2015*;
- Commission Européenne. (2011). Règlement No. 10/2011 concernant les matériaux et objets en matière plastique destinés à entrer en contact avec des denrées alimentaires;
- Commission Européenne. (2013). *Food labelling - EU rules 2014*.
- Comité scientifique des risques sanitaires émergents et nouveaux

➤ En France:

- Ministère de l'Écologie et du Développement Durable;
- Ministère de l'Économie, de l'Industrie et de l'Emploi (MEIE);
- Ministère de l'Économie et des Finances (MEF);
- Ministère de l'Économie, de l'Industrie et du Numérique (MEIN).
- Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques;
- Centre National de Recherche Scientifique (2005, 2006, 2008);
- Conseil National de l'Alimentation (CNA);
- Conseil National de l'Emballage (CNE);
- Conseil supérieur de la recherche et de la technologie (CSRT);
- Institut national de l'environnement industriel et des risques (INERIS)

- Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail (Afsset);
- Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses);
- Institut national de la recherche agronomique (INRA)

➤ Au Canada

- Ministère de l'Économie, de l'Innovation et des Exportations;
- Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques;
- Centre de Recherches pour le Développement International (CRDI);
- Programme ECOSANTE;
- Comité d'experts Sur Les Nanotechnologies (Conseil des académies Canadiennes)

➤ Au Québec

- Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et sécurité du travail (IRSST);
- Commission de l'éthique en science et en technologie;
- Front Commun Québécois pour une Gestion Écologique des Déchets (FCQGED).

3. Des organismes de recherche et des ONG

- Woodrow Wilson International Center for School (Etats-Unis);
- PEN: The Project on Emerging Nanotechnologies (Etats-Unis);
- ONG : les Amis de la Terre (international);
- VivAgora (France);
- La Chaire Internationale sur le cycle de vie (Québec);

- Front Commun Québécois pour une Gestion Écologique des Déchets (FCQGED) (Québec).

Au plan gouvernemental, nous avons donc recensé les informations pertinentes provenant de nombreux ministères de France et du Canada qui reflètent les positions gouvernementales sur la réglementation des nanotechnologies et leur utilisation dans l'emballage alimentaire.

L'exploration des sites internet du gouvernement du Canada, particulièrement ceux d'Environnement Canada et de Santé Canada ont permis de prioriser les thématiques suivantes:

- Les emballages alimentaires;
- Les différents types de nano-emballage et de nanos utilisées;
- Leurs enjeux et leurs impacts respectifs;
- Les risques pour la santé humaine et l'environnement;
- Les dispositifs d'évaluation et d'encadrement des nano-emballages.

Plusieurs monographies sur les nanotechnologies ont été examinées avec grand profit. Même si elles ne traitent pas spécifiquement le domaine des nano-emballages, certaines ont été très pertinentes en ce qui a trait à la littérature sur les nanotechnologies. Parmi ces auteurs, qu'on retrouvera dans la bibliographie, on peut citer (B.-L Browaeys; C. Papillou; C. Lafontaine; Vinck, D; Lesca, N; Vivien, F.-D,....etc.), qui ont publié des précieux travaux sur les applications et la gouvernance des nanotechnologies:

- Balthazard, B.-L. (2006).
- Beck, U, (2008).
- Browaeys, D.B. (2009).
- Vinck, D. (2009).
- Papilloud, C. (2010).

Ces documents se sont avérés être très pertinents pour appréhender la question des impacts des nanoparticules dans l'emballage alimentaire sur la santé humaine et l'environnement. Les autres documents sont cités dans la bibliographie.

Ajoutons que de nombreux journalistes et chroniqueurs ont beaucoup écrit sur la question, dont notamment Marrie Adam (Marketing Produits Grandes Consommation PGC, France); Angela Bolis (Le Monde, France); et Christine Gâteau (Journal des sociétés, France), dont les écrits sur les nanoemballages se sont avérées être fort précieux dans le processus de construction de notre réflexion.

II.5 Conclusion du chapitre II

Pour mieux comprendre le dossier des nano-emballages alimentaires, il nous a semblé essentiel d'adopter des approches englobantes permettant d'intégrer de nombreux angles et niveaux d'analyse, ce qu'on permis notamment les approches écosanté et cycle de vie. Par la suite le travail de revue de littérature scientifique et d'analyse documentaire, nous a permis de mieux cerner la problématique des nano-emballages et leurs impacts sur la santé et l'environnement. Pour mieux comprendre ces impacts, nous avons ensuite exploré l'industrie de l'emballage alimentaire, ses lignes de force et les principaux facteurs qui l'influencent ainsi que les différents types d'emballage à base de nanoparticules qui font l'objet du chapitre III.

CHAPITRE III

ÉVOLUTION DU DOSSIER DU NANO-EMBALLAGE

III.1 Historique

Le besoin d'emballer les aliments date de la préhistoire. En effet, les chasseurs préhistoriques enveloppaient leurs gibiers dans des peaux d'animaux afin de faciliter le transport d'une part et d'autre part pour les protéger des intempéries. En outre, cette technique rudimentaire permettait également de préserver les aliments plus longtemps. Les premières vagues de déplacements des êtres humains semblent justifier ce besoin. Bertolini (1995) souligne aussi l'utilisation de matériaux naturels dont les feuilles et les écorces d'arbres, les pierres creuses et les coquillages pendant cette période. C'est vers 6000 avant J.-C., qu'apparaît l'utilisation des Calebasses, des tissus, des céramiques, des paniers et des poteries (ibid.). Les premiers récipients en verre furent utilisés par les Égyptiens à partir de 1500 avant J.-C. plus tard, c'était le tonneau qui faisait son apparition avec les Gaulois et en 1746¹⁰, les Anglais créaient le premier produit emballé sous marque à partir de la poudre antipyrétique (Bertolini, 1995; Duriez, 2015). Jusqu'à la fin du XIX^e siècle, l'utilisation des matériaux bruts: le cuir, le bois, l'argile, le liège, les fibres, etc. ou des matériaux transformés: le verre, les métaux, le papier, etc. étaient prépondérants (Urvoy et Sanchez, 2007). L'essor du matériau moderne et pratique: le plastique se conjugue avec les innovations du XX^e siècle (Duriez, 2015).

¹⁰ Source: <http://www.g1alternative.com/bloggrafik/lemballage-alimentaire-historique-tendances-et-innovations/> (consulté le 20/03/2015)

Tableau III.1 : Repères de l'histoire de l'emballage alimentaire

Dates	Repères
1809	Nicolas Appert découvre le procédé de conservation par la chaleur des denrées alimentaires contenues dans des bocaux en verre.
1810	Le procédé est appliqué à des boîtes en fer blanc (boîtes de conserve).
1858	L'Américain Mason crée le couvercle métallique à vis pour les pots en verre.
1871	Jones (États-Unis) invente le carton ondulé.
1883	Stilwell (États-Unis) commercialise les premiers sacs en papier.
1885	Painter (États-Unis) dépose le brevet de la première capsule de bouteille jetable.
1934	L'American Can Company commercialise les premières « boîtes boissons » ancêtres des canettes pour la brasserie américaine Krueger.
1951	Invention en Suède de l'ancêtre du Tetrapak: emballage tétraédrique jetable en papier plastifié.
1969	Après Lesieur en 1960, Vittel commercialise ses premières maxibouteilles rondes en PVC (polychlorure de vinyle).
1976	Pepsi-Cola vend ses premières bouteilles en PET (polyéthylène).
2000	Apparition du Doy pack: sachet en plastique souple tenant debout.
2005	Le fabricant Tetrapak lance le Tetrapak Wedge Aseptic Clear: emballage transparent.

Source : (Urvoy et Sanchez, 2007)

III.2 Types d'emballage alimentaire

On distingue de façon générale, trois types d'emballages selon la fonction qu'ils remplissent :

- ✓ L'emballage primaire ou emballage de vente: c'est la plus petite unité de contenant destinée à la vente. Il entre directement en contact avec le produit de consommation. Les professionnels du milieu l'appellent aussi « conditionnement¹¹».
- ✓ L'emballage secondaire ou emballage de groupage est le rassemblement de plusieurs emballages primaires contenant des denrées. Il est aussi appelé suremballage (surpackaging).
- ✓ L'emballage tertiaire ou emballage de transport ; c'est le regroupement des emballages secondaires en de colis compacts de grande taille. On parle de packaging (Heillbrunn et Barré, 2012).

Si dans le premier type d'emballage, ce sont les fonctions de stockage, de conservation et/ou de préservation qui sont visées, dans le second type ce sont surtout les fonctions de manutention, de transport, d'écoulement (vente) ainsi que de protection qui suscitent l'intérêt, on peut citer par exemple le pack de six cannettes de soda. Le dernier type d'emballage répond essentiellement aux besoins de transport et de disposition (op. cit.).

L'emballage croissant des denrées résulte de multiples facteurs interreliés. L'urbanisation, la baisse de l'autoconsommation rurale, la hausse des niveaux de vie et les transformations des modes de vie ainsi que la quête constante de nouvelles commodités contribuent à expliquer cette augmentation (Bertolini, 1995). À ces facteurs, on peut ajouter le développement des transports et de la logistique de

¹¹ Source: <http://www.logistiqueconseil.org/Articles/Entrepot-magasin/Emballage-niveaux-unites.htm> (consulté le: 15/04/2015).

distribution, les nouvelles formes de vente, l'avènement du libre-service, le supermarché ainsi que de l'hypermarché. La fabrication d'emballages devient alors une industrie majeure, production en très grandes séries de façon automatisée s'appuyant sur des technologies de pointe. L'emballage entre ainsi dans le champ du marketing et du marchandisage (op. cit.). La croissance de l'industrie des emballages alimentaire se justifie aussi par la hausse de l'industrie agroalimentaire et par les multiples fonctions que remplissent ces emballages (Beauchesne, 2008 ; Gustavo, 2011).

III.3 Mise en contexte de l'industrie de l'emballage alimentaire

L'industrie alimentaire mondiale intégrant les nanotechnologies est en expansion rapide. La création, en 2013, en France de dispositifs de déclaration obligatoire adoptés ensuite également en Belgique et au Danemark, a permis, selon Vandelac (2015) de mieux comprendre l'importance du marché des nanoproducts:

Durant les 5 premiers mois de 2014, les déclarations des 1400 entités françaises, portant sur près de 400 000 tonnes de substances à l'état nanoparticulaire, réparties en 319 catégories de substances, se sont concentrées à 2 % dans la fabrication de produits alimentaires et à 58% dans le secteur (agriculture, sylviculture, pêche) (MEDDE, 2014 cité dans Vandelac, 2015, s.p.).

L'industrie de l'emballage, en France, selon le MEF (2012), est encadrée par une réglementation stricte qui exige l'utilisation de matériaux qui doivent satisfaire à des normes spécifiques selon la nature des denrées à protéger. Les emballages alimentaires répondent à des fonctions précises qui n'ont pas changé depuis la révolution de cette industrie, mais connaissent une importance croissante dans la vie quotidienne des consommateurs:

- Une fonction de contenant: l'emballage est avant tout un récipient associé à des servitudes métrologiques réglementaires «obligation de l'indication exacte de la masse ou du volume contenu» (Multon et Bureau, 1998; Benslimane, 2014).
- Une fonction de présentation qui vise à retenir l'attention et à séduire l'acheteur dans le linéaire de distribution (c'est la fonction qui intéresse les services «marketing») (Multon et Bureau, 1998).
- Une fonction d'information par l'étiquetage, «de plus en plus importante associée à des servitudes réglementaires quant aux types d'informations et à la loyauté des renseignements donnés» (Benslimane, 2014). En outre, les responsables commerciaux souhaitent souvent donner des informations supplémentaires qui seront des arguments de vente, promotions, nouveautés, conseils d'utilisation, etc. (Lapointe, 2012).
- Une fonction de service. Dans ces cas l'emballage fournit un service spécifique comme «le flacon pulvérisateur, le flacon saupoudreur, la boîte autochauffante, etc» (Multon et Bureau, 1998). La notion de service s'étend également à la commodité d'emploi notamment à la facilité d'ouverture sans autres outils particuliers. On pourrait inclure dans cette fonction de service une fonction de réutilisation (second usage de certains emballages) (op. cit.).
- Une fonction de sécurité, qui vise à protéger les aliments contre toute contamination qu'elle soit physique, chimique et microbiologique durant le transport ou dans les cas de délits: fraude, vol par substitutions, malveillance, etc.

- Une fonction de protection physique contre les chocs mécaniques durant le transport ou la manutention, les changements de température (emballages isothermes) et la variation de la lumière (à titre d'exemple: matériaux filtrant les UV) (Benslimane, 2014).
- Une fonction d'auxiliaire technologique de protection de la qualité des produits alimentaires contre les agents externes de dégradation physique, chimique et biochimique des aliments, combinés à une exigence de béginité toxicologique de la matière composant l'emballage par rapport à son contenu (AICO, 2005; Multon et Bureau, 1998; Benslimane, 2014). Comme le mentionne Grob *et al.* (2012), «l'emballage protège ce qu'il vend et vend ce qu'il protège».

III.4 Le poids de l'industrie de l'emballage alimentaire

Les nouvelles technologies ont été intégrées au secteur de l'emballage, permettant ainsi non seulement de suivre, mais aussi d'anticiper certaines évolutions de consommation (Moati *et al.*, 2000). Le poids économique du secteur de l'emballage alimentaire l'induit constamment à innover pour s'adapter aux attentes du consommateur et répondre aux exigences en matière d'environnement et de sécurité alimentaire (op. cit.). Au fil des années, l'industrie a produit des emballages sous atmosphère modifiée, sous vide, des emballages actifs qui augmentent la durée de vie de l'aliment en modifiant son environnement et enfin des emballages intelligents qui donnent de l'information sur la qualité du produit par l'introduction d'une étiquette qui change de couleur si le produit est altéré (FAO/OMS, 2011).

Aujourd'hui, les emballages alimentaires constituent un enjeu majeur tant pour les firmes qui les produisent que pour les entreprises agroalimentaires (près de 20 % des coûts d'achat) (Mellouet *et al.*, 2009). «C'est un produit industriel soumis à des contraintes technologiques, réglementaires, marketing et environnementales» (Duriez, 2015) utilisant des matériaux et des formes différentes.

Au plan mondial, l'industrie de l'emballage représentait au début des années 2010 un marché de plus de 650 milliards de dollars US employant 5 millions de personnes dans 100 000 entreprises (dont plus de 65 % dans le secteur alimentaire¹²). À la fin des années 2000, les États-Unis constituaient le premier marché en importance représentant environ 100 milliards de dollars US suivis du Japon, de l'Allemagne et de la France avec des marchés respectifs de 80, 29 et 19 milliards de dollars US (Beauchesne, 2008). Au Québec, le chiffre d'affaires de l'industrie de l'emballage s'élève à environ 5 milliards de dollars US dont 60 % concentré dans le secteur alimentaire (*ibid.*).

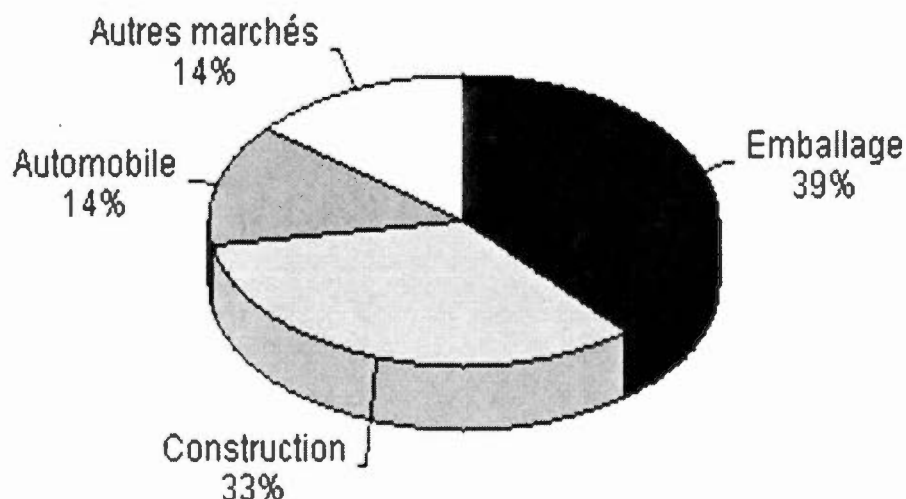
L'industrie de l'emballage alimentaire se compose de différents secteurs selon les matières utilisées. Le tiers du marché de l'emballage soit 36 % dans le monde et 41 % au Québec est destiné à la fabrication du papier et du carton (Bouchesne, 2008, p. 8). Plus de 50 % de cette production est destinée à l'agroalimentaire (*opt.* : p 16). Pour les consommateurs, la facilité à recycler devient un critère de choix important. De plus, le papier et le carton offrent une bonne protection du produit et préservent les denrées périssables (Duriez, 2015). C'est une matière renouvelable et biodégradable, car elle se décompose en quelques années contre 100 à 400 ans pour la durée de vie du plastique (Beauchesne, 2008 ; Cloutier, 2012). Les entreprises agroalimentaires préfèrent le papier et le carton pour leurs faibles coûts. En outre ce sont des produits recyclables à moindre coût. Par ailleurs, ils sont légers, opaques et résistants. Comme

Source:¹² http://www.groupeexport.ca/uploads/contribute/fr/bulletins/201211/documents/Emballagealimentaire_000.pdf. Consulté le: 02/12/2015

emballage de transport, le carton ondulé permet de transmettre l'image de marque du produit (Beauchesne, 2008). Par contre, ce type d'emballage donne une vieille image et est sensible à l'humidité. C'est un matériau non étanche et les municipalités ne récupèrent pas le papier lorsqu'il est souillé.

Son plus proche concurrent est le plastique qui couvre environ 30% du marché et continue à élargir sa part à travers ce qui est aujourd'hui appelé le suremballage (op. cit.: 20). Selon le Ministère de l'Économie, de l'Industrie et de l'Emploi (MEIE) (2008): «En Europe, le plastique est, avec le papier-carton, le matériau le plus utilisé dans l'emballage. Sa fabrication requiert 12,5 millions de tonnes de matières premières par an. Le secteur agroalimentaire constitue le premier client de l'emballage plastique (65 % des débouchés en Europe)» (MEIE, 2008, p. 11).

Selon le Gouvernement Canada (2017), « Bien que la gamme des produits en plastique soit très étendue, trois grandes utilisations dominant: l'emballage (39%des expéditions), les articles de construction (33%) et les composants pour véhicules automobiles (14%) ». (voir figure III.1)



Source: Innovation, Sciences et Développement économique Canada, cité dans (Gouvernement Canada, 2017: s.p).

En 2010, on comptait au Canada:

2 422 établissements (...) qui transformaient des résines synthétiques en produits en plastique. Cette industrie a engendré des expéditions d'une valeur de 17,6 milliards de dollars et a employé 76 350 personnes. Suite à une baisse de la production causée par la récession, l'industrie a montré une bonne croissance en 2010. (Gouvernement Canada, 2017. s.p)

Rappelons que:

Les produits en plastique ne sont pas seulement fabriqués par des entreprises appartenant à l'industrie des produits en matière plastique comme telle, mais aussi par d'autres groupes d'industries à titre d'activité secondaire, à la fois pour le commerce (jouets et mobilier en plastique) et pour les besoins internes (bouteilles en plastique fabriquées sur place par un fabricant de shampoing) (Gouvernement Canada, 2017, s.p).

En 2010, les exportations canadiennes en termes de plastique se sont élevées à 6,7 milliards de dollars alors que les importations ont été évaluées à 7,6 milliards de dollars.

Les exportations canadiennes ont augmenté d'une façon impressionnante pendant les années 1990 pour passer de 18% du montant des expéditions totales en 1990 à 41 % en 2010. Les importations canadiennes des produits de plastique ont également considérablement augmenté pendant cette période et en 2010 elles représentaient 41 % du total de la consommation canadienne (ibid., s.p).

Bon nombre de consommateurs considèrent que le plastique est sécuritaire, léger et facile à transporter. Les entreprises agroalimentaires choisissent le plastique pour sa flexibilité, sa maniabilité, sa légèreté et sa transparence. Grâce aux innovations, en termes de conception et d'étiquetage, le coût de l'emballage plastique est devenu très concurrentiel avec le carton (Beauchesne, 2008). Son prix croît avec la hausse du prix du pétrole (Lapointe, 2012) puisqu'il s'agit d'un sous-produit du pétrole. Même s'il offre des avantages au niveau de la manutention du produit, le plastique demeure un désastre pour l'environnement (MEIE, 2008).

Selon le Front Commun Québécois pour une Gestion Écologique des Déchets (FCQGED) (2016), au Québec on distribue 1 milliard de sacs de plastique chaque année. Et cet organisme ajoute qu'aujourd'hui, «plus de 500 milliards de sacs sont distribués annuellement à travers le monde (16 000 sacs par secondes !))» (FCQGED, 2016, s.p.). Or, les emballages et autres produits de plastique constituent une source majeure de contamination de la chaîne alimentaire et de déclin des espèces marines, notamment (Kuestner, 2016).

Les emballages en verre n'ont pas connu d'innovation majeure au cours des dernières années. Leur popularité varie suivant les pays. En Allemagne, il est largement utilisé,

car il est perçu comme recyclable et respectueux de l'environnement (Beauchesne, 2008). L'emballage en métal est utilisé dans les cannettes et les boîtes de conserve. L'aluminium utilisé comme emballage est léger, résistant, mince, stable et flexible. En revanche, il est cher. En dépit de ces qualités, contrairement à la France, notamment, les revêtements de boîtes de conserve en Amérique du Nord contiennent du Bisphénol A un puissant perturbateur endocrinien, ce qui pose des problèmes de santé.

Quant aux emballages de bois qui donne une image de nature et de tradition, sa matière première est renouvelable et résistante à l'humidité, mais il est peu flexible dans ses formes et les usages (Kleinschmit von Lengefeld, 2016: 122).

III.5 Facteurs influençant l'industrie des emballages alimentaires

L'industrie des emballages alimentaires est soumise à un ensemble de pressions de la part des transformateurs alimentaires, des détaillants et des consommateurs.

III.5.1 La pression des consommateurs

Les consommateurs souhaiteraient avoir davantage de produits recyclables et d'emballages écologiques. Les arguments en faveur du développement durable ne manquent pas. Ils veulent également des informations concernant l'impact d'un matériau sur l'environnement pendant toute sa durée de vie. Dans le tableau suivant, on illustre les facteurs d'influence provenant des consommateurs québécois et les réponses apportées en termes d'emballages alimentaires, selon l'enquête réalisée par Beauchesne en 2008 au Québec.

Tableau III.2. Facteurs influençant l'industrie de l'emballage alimentaire:
Pressions des consommateurs

Facteurs d'influence provenant des consommateurs	Réponses apportées en termes d'emballages alimentaires
<ul style="list-style-type: none"> ▪ La préoccupation « santé » de la part des consommateurs : <ul style="list-style-type: none"> - fraîcheur - saveur - qualités nutritionnelles - contrôle des portions, des calories 	<ul style="list-style-type: none"> • Emballages intelligents pour garantir la fraîcheur • Nouveaux emballages permettant de garder différents ingrédients séparés jusqu'à l'ouverture du paquet
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Diminution de la taille des ménages et modes de vie favorisant les repas seuls ou à deux 	<ul style="list-style-type: none"> • Portion individualisée
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Mode de vie très mobile, très occupé, multiples activités. Tendance à la consommation hors domicile 	<ul style="list-style-type: none"> • Emballages « refermables », avec différentes sortes de fermetures • Emballages pour portions « on-the-go » • Produits emballés individuellement
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Recherche de confort d'utilisation 	<ul style="list-style-type: none"> • Emballages allant au four et au micro-onde • Maniabilité, facilité à saisir à la main • Ouverture facile • Système de refroidissement de la bière

<ul style="list-style-type: none"> ▪ Préoccupation l'environnement 	<p style="text-align: center;">pour</p> <ul style="list-style-type: none"> • Utilisation de ressources renouvelables/ accroissement de la « recyclabilité » des emballages • Sans agents blanchissants • Diminution de l'épaisseur des matériaux • Économies d'énergie
---	--

Source: (Beauchesne, 2008, p10)

III.5. 2 Pression des transformateurs alimentaires

En 2008, selon toujours l'étude de Beauchesne au Québec, la première et la principale fonction que les transformateurs alimentaires attendent de l'emballage est la protection des aliments, son étanchéité et sa résistance. Leur second souci est que les emballages contribuent à la conservation des aliments. Les transformateurs souhaitent également que l'emballage soit attrayant et donne une bonne idée du produit pour susciter sa vente. Ils exigent par ailleurs que l'emballage alimentaire soit facile d'utilisation, réutilisable, sécuritaire, propre, respectueux de l'environnement, inodore et moins coûteux. Dans le tableau ci-dessous, on illustre les facteurs d'influence provenant des transformateurs et les réponses en matière d'emballage alimentaire fournies par l'industrie.

Tableau III.3: Facteurs influençant l'industrie de l'emballage alimentaire, pression des transformateurs alimentaires

Facteurs d'influence provenant des transformateurs	Réponses apportées en matière d'emballages alimentaires
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Retenir l'attention des consommateurs 	<ul style="list-style-type: none"> • Nouvelles techniques d'impression permettant des emballages plus remarquables • Nouveaux emballages intégrant des hologrammes • Intégration de senteurs à l'emballage • Nouveaux formats
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Conservation des aliments 	<ul style="list-style-type: none"> • Barrières
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Différenciation des produits 	<ul style="list-style-type: none"> • Emballages versatiles • Impressions d'étiquettes • Nouvelles formes et formats
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Coût 	<ul style="list-style-type: none"> • Automatisation des lignes de conditionnement • Réduction de l'espace résiduel dans l'emballage • Emballage plus léger
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Réduction des bris 	<ul style="list-style-type: none"> • Utilisation du plastique et résistance accrue des emballages en carton

Source: (Beauchesne, 2008, p11).

III.5.3 Pression des détaillants

Beauchesne a réalisé, aussi, son étude de 2008 auprès des détaillants québécois, pour savoir quelles sont les pressions de ces derniers sur l'industrie de l'emballage alimentaire. Le résultat est résumé dans le tableau suivant :

Tableau III.4. Facteurs influençant l'industrie de l'emballage alimentaire, pression des détaillants

Facteurs d'influence provenant des	Réponses apportées en matière d'emballages alimentaires
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Réduire les impacts sur l'environnement/image respectueuse de l'environnement 	<ul style="list-style-type: none"> • Utilisation de ressources renouvelables • Sans agents blanchissants • Diminution de l'épaisseur des matériaux • Économies d'énergie
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Réduction des bris 	<ul style="list-style-type: none"> • Utilisation du plastique et résistance accrue des emballages en carton
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Durée de conservation des aliments 	<ul style="list-style-type: none"> • Barrières
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Facilité de logistique, entreposage et présentation 	<ul style="list-style-type: none"> • Emballages rigides

Source: (Beauchesne, 2008, p12).

Ainsi, l'emballage idéal est celui qui tout en respectant toutes les exigences réglementaires, est compatible avec les aliments en identifiant et en fournissant de l'information sur l'aliment à protéger de toute contamination. Il doit aussi servir à contrôler l'environnement du produit et le préserver contre les dommages matériels.

De plus, il doit être hygiénique, attrayant, inviolable, pratique, léger, économique, écologique et peut servir à la fois à préparer ou à servir les aliments. L'emballage idéal devrait susciter l'autovente de son produit (AICO, 2005).

III.6 Conclusion du Chapitre III

Pour satisfaire les consommateurs et gagner leur approbation, l'industrie de l'emballage doit adopter une stratégie de gestion, fondée sur les principes du développement durable. Chez le consommateur, le développement durable, sujet de préoccupation de l'industrie de l'emballage, représente, actuellement, autant de poids que le coût¹³. Reste à savoir, comment appliquer le principe de développement durable pour fabriquer un emballage dit durable. Gustavo (2011) souligne que l'emballage «doit considérer les impacts de l'emballage sous les trois angles du « triple bottom line», c'est-à-dire, les angles économiques, sociaux et environnementaux» (Gustavo, 2011:94).

L'industrie de l'emballage doit, aussi, prendre en considération le cycle de la vie entière de l'emballage, à partir des matières premières jusqu'au produit final, afin d'éviter les problèmes transférés durant le processus de fabrication.

Les nanoparticules utilisées dans la fabrication des emballages peuvent leur apporter des propriétés bien précises, qui sont présentement très demandées. Le dioxyde de titane, le nanoargent, ou l'oxyde de zinc peuvent contribuer à préserver la fraîcheur et la durabilité du produit en ralentissant la prolifération des bactéries¹⁴. Toutefois, ils

¹³ Source: <http://www.imsinc.ca/le-marqueur/septembre-2013/priorites-de-l-industrie-de-l-emballage-2012-2022/>. Consulté le : 20/12/2015.

¹⁴ Source: http://www.swissinfo.ch/fre/perspectives_les_emballages_se_font_intelligents-/35300726. Consulté le: 21/12/2015.

posent un risque potentiel pour la santé humaine et l'environnement, tel que nous le verrons dans le chapitre IV.

CHAPITRE IV

PROBLÉMATIQUE: SECTEUR NANOALIMENTAIRE ET EMBALLAGES

IV.1 Emballages alimentaires contenant des nanoparticules

Les emballages se caractérisent par un contenu en innovation de plus en plus important. Leurs fonctionnalités vont dorénavant au-delà des objectifs principaux qui consistent à contenir, à transporter et à stocker les produits. Selon le MEIE (2008):

La micro-encapsulation, par exemple, a permis d'intégrer sur certains emballages, des absorbeurs d'oxygène ou d'humidité tandis que d'autres emballages utilisent des papiers indicateurs temps-températures (ITT). Ce type d'emballage peut fournir des renseignements sur le degré de respect de la chaîne du froid par exemple. En lien avec la demande du consommateur, les emballages contribuent à allonger la durée de vie du produit, à en assurer une meilleure traçabilité et à lui fournir une protection renforcée (MEIE, 2008, s.p.).

La croissance de la nanotechnologie dans l'industrie de l'emballage a permis d'ouvrir plusieurs axes quant à l'amélioration des propriétés et caractéristiques des emballages (CEST, 2011), qu'il «s'agisse d'une meilleure résistance aux contraintes mécaniques, d'une plus grande imperméabilité aux gaz, d'une augmentation de la résistance à la chaleur ou d'une amélioration de la qualité d'impression pour faciliter l'étiquetage » (ibid, p.24). Depuis plusieurs années, on assiste au développement de nouvelles avancées concernant, principalement, les emballages actifs susceptibles de prolonger

la durée de vie du produit, et les emballages dits intelligents qui contrôlent les conditions de transport et de stockage (MEIE, 2008).

Actuellement, une variété de nanomatériaux a été introduite dans l'emballage des aliments comme additifs fonctionnels y compris les nanoparticules d'argent, de nanoargile, le nano-oxyde de zinc, le nanodioxyde de titane, et les nanoparticules de nitrure de titane (Mohanty *et al.*, 2009 ; Tager, 2014). À cause des différences dans la structure chimique et ses caractéristiques, chaque nanomatériau introduit des propriétés distinctes dans la matière hôte qui mène à différentes applications d'emballages fonctionnels (Rubilar *et al.*, 2014 cité dans Bumbudsanpharoke et Ko, 2015).

IV.1.1 Emballage intelligent

Ce sont des emballages dans lesquels on ajoute divers nanosenseurs qui ont la capacité de mesurer des variations de la température et de détecter le degré de détérioration des aliments (CEST, 2011). Ces emballages peuvent aussi gérer et contrôler les conditions de l'environnement entourant l'aliment (Smolander et chaudhry, 2010). Selon le Conseil National de l'Alimentation (2009): « les emballages intelligents contiennent des composés ou des systèmes capables d'enregistrer ou d'afficher divers indicateurs ou marqueurs de la qualité ou de la traçabilité, pendant la fabrication, le transport, l'entreposage ou la consommation du produit » (CNA, 2009, s. p).

Ceci est réalisé en utilisant « des indicateurs ou des systèmes analytiques miniaturisés communiquant directement avec le consommateur » (CNA, 2009). Certaines encres issues des nanotechnologies peuvent être utilisées pour fournir des informations sur la qualité et l'état des produits (CEST, 2011). Par exemple, on utilise une encre

contenant des nanoparticules d'oxyde de titane (TiO_2) sensibles à la lumière pour détecter l'oxygène dans les emballages (Industrie et Technologies, 2013; FAO/OMS, 2011).

Certains matériaux d'emballage intelligent sont déjà présents sur le marché. Ils ont la possibilité de détecter des défauts de scellage qui pourraient conduire à une exposition involontaire de l'aliment à l'oxygène et aux micro-organismes (Adam, 2013). D'autres fournissent aux consommateurs et aux distributeurs les caractéristiques des conditions dans lesquelles ont été gardés les aliments. Ils peuvent même déterminer le micro-organisme présent et dans quelle proportion (op. cit.). Les emballages intelligents ont la capacité d'établir la date exacte d'expiration du produit. Il est vrai que le producteur prendra en considération les conditions d'entreposage et de livraison programmée pour fixer la date limite de consommation apposée sur l'emballage (Adam, 2013).

Plusieurs techniques permettent de transformer un emballage ordinaire en emballage intelligent. La première consiste à imprimer à l'aide d'encre spéciale conductrice de minuscules circuits électroniques sur du papier susceptible d'absorber l'énergie électromagnétique, et qui utilisés comme conducteurs de chaleur et peuvent servir à la fabrication d'emballages alimentaires chauffants (CE, 2004). Les circuits intégrés au papier peuvent aussi former des antennes qui émettent des radiofréquences capables de communiquer toutes sortes de données relatives à un objet incluant son prix, son poids et d'autres caractéristiques (op. cit.). Les avancées technologiques ont permis le développement d'emballages et d'étiquettes thermochromiques qui réagissent aux variations de température et permettent d'indiquer si par exemple, un produit est chaud ou froid. D'autres dispositifs d'emballages intelligents utilisent des encres bioactives qui peuvent être imprimées, couchées ou imprégnées dans un papier

classique. Ces encres sont capables de détecter des réactions chimiques soulignant un changement dans un produit¹⁵.

IV.1.2 Emballage actif

Selon le rapport de la FAO/OMS (2011), l'emballage actif est un emballage qui «contient des composés actifs qui réagissent avec l'environnement pour conserver le produit. Il permet des échanges de gaz, de vapeurs ou de solutés entre l'aliment, l'emballage et éventuellement l'atmosphère entourant le produit» (FAO/OMS, 2011, p.12). Ces emballages actifs ont «une action propre sur le ralentissement de certaines réactions de détérioration des aliments» (Conseil National de l'alimentation (CNA), 2009). Par exemple, un emballage peut être utilisé pour libérer un agent gazeux quand l'aliment commencera à pourrir afin de contrer le processus de mûrissement (Chaudhry *et al.*, 2008).

Le Conseil National de l'alimentation (2009), souligne que:

Les meilleurs exemples d'emballages actifs couramment utilisés depuis quelques années pour de nombreux produits alimentaires (salaisons, charcuteries, fruits et légumes, etc.) sont: les absorbeurs de vapeur d'eau, d'oxygène ou d'éthylène, les émetteurs d'éthanol ou de composés antimicrobiens ainsi que des matériaux contenant des sels d'argent à propriétés antimicrobiennes (CNA, 2009, p. 12).

Les emballages actifs les plus développés actuellement sont les emballages aux propriétés antimicrobiennes (Adam, 2013). Plusieurs types de nanoparticules peuvent être utilisés dans le développement de ce type d'emballage. Elles fonctionnent essentiellement en neutralisant le micro-organisme directement dans l'emballage,

¹⁵ Source: <http://www.carbonepropre.com/fibre/papiers-et-emballages-intelligents>. Consulté le: 04/12/2015

mais peuvent aussi migrer et réagir avec ceux présents dans le produit alimentaire (op. cit.). Les plus étudiées sont les nanoparticules d'argent stables à la température et peu volatiles (Hameed Hyder, 2003 cité dans IRSST, 2006). Elles sont connues pour leurs propriétés antibactériennes et antifongiques (Benoit, 2012). Elles agissent en se liant au micro-organisme et provoquent la dégradation de la paroi qui l'entoure formant ainsi des trous qui leur permettent de pénétrer dans la cellule (op. cit.). Elles risquent d'endommager l'ADN et de libérer des ions argent qui se lient avec des molécules nécessaires au bon fonctionnement du micro-organisme. Ce qui conduit à la mort de la cellule (Adam, 2013, s.p). Des emballages actifs antimicrobiens contenant des nanoparticules d'argent ont été déjà développés et mis en vente (la boîte plastique réutilisable, barquette jetable, etc.,) (op. cit.).

IV.1.3 Emballage biodégradable

Dits aussi emballages comestibles, ces emballages sont fabriqués à base de polymères d'origine biologique ou « bio-polymères » (Robinson et Morrison, 2009). Selon les recherches, en combinant ces bio-polymères à certains nanomatériaux, nous obtiendrons des propriétés pouvant contribuer à améliorer la qualité des emballages tout en demeurant biodégradables et « sécuritaires pour l'environnement » (ETC Group, 2004).

IV.2 Avantages des nanomatériaux pour les applications d'emballages alimentaires

Jusqu'à présent, selon (Ramachandraiah *et al.*, 2014), l'emballage alimentaire compterait parmi les secteurs les plus prometteurs pour l'application des nanotechnologies, en raison, on l'a déjà indiqué, des grands avantages sur les propriétés mécaniques et chimiques obtenues avec ces substances (la biodisponibilité

améliorée, les effets antimicrobiens, l'acceptation sensorielle améliorée et la distribution ciblée de composés bioactifs). De nombreuses publications (Sanchez-Garcia *et al.*, 2010; Chaudhry *et al.*, 2008; Cushen *et al.*, 2012; Duncan, 2011; de Moura *et al.*, 2011; Silvestre *et al.*, 2011; Siqueira *et al.*, 2014; Esmailzadeh *et al.*, 2016; Wyser *et al.* (2016); Azlin-Hasim *et al.*, 2016), portent sur les avantages potentiels des nanomatériaux pour les applications d'emballages alimentaires.

Afin d'évaluer les effets de l'emballage «nano-CaCO₃ -based low density polyethylene (nano-CaCO₃ -LDPE) » sur la qualité de la canne à sucre fraîche, Luo du Département des sciences et de la nutrition des aliments, de l'Université du Zhejiang, Hangzhou, en République populaire de Chine, et ses collègues (2014) ont examiné la qualité de la canne à sucre fraîche, les concentrations d'O₂ et de CO₂ dans les emballages, la qualité visuelle globale (OVQ), le nombre total de bactéries (TBC), le nombre de levures et de moisissures (YMC), la teneur en sucre et le contenu phénolique total, la respiration, l'éthylène, la production et les activités de la phénylalanine ammoniacale-lyase (PAL), du polyphénol oxydase (PPO), de la peroxydase (POD), de l'invertase acide (IA) et de l'invertase neutre (NI), durant le stockage à 10 °C pendant 5 jours. Les résultats ont indiqué que l'emballage de nano-CaCO₃-LDPE avec le stockage froid est une approche prometteuse pour inhiber le brunissement et le maintien de la qualité de la canne à sucre fraîche.

Les films de carboxyméthylcellulose contenant des nanoparticules de chitosane synthétisés et caractérisés par de Moura *et al.*, (2011) pourraient constituer un matériau potentiel pour les produits d'emballage alimentaire et de boissons en raison de l'augmentation de leurs propriétés mécaniques et de leur stabilité élevée. Sanchez-Garcia *et al.*, (2010) ont aussi constaté que les nanocomposites à base de carraghénane (un galactane fortement sulfaté extrait des Algues rouges)¹⁶ peuvent avoir un potentiel important pour développer des films d'emballage et des

¹⁶ <https://www.aquaportail.com/definition-1388-carraghenane.html>

revêtements pour l'extension de durée de conservation des produits alimentaires. L'application potentielle des nanocomposites préparés viserait donc l'industrie de l'emballage afin de prolonger la durée de conservation des produits.

Comme nous le verrons dans les prochaines sous-sections plusieurs types de nanoparticules peuvent être utilisés dans le développement de nano-emballage alimentaire.

IV.2.1 Les Nanos-argents

Les Nanos argent sont largement utilisées dans les produits de consommation en raison de leurs propriétés antibactériennes. Siqueira *et al.*, (2014) ont étudié l'activité antimicrobienne des nanoparticules d'argent pour les applications dans l'emballage alimentaire. Ces nanoparticules ont été préparées et incorporées dans des films de carboxyméthylcellulose, et les résultats montrent que les nanoparticules d'argent inhibent la croissance des microorganismes testés. Le film de carboxyméthylcellulose montre un meilleur effet antimicrobien contre la bactérie Gram positif (*E. faecalis*) et Gram négatif (*E. coli*). Une autre étude réalisée par Azlin-Hasim *et al.*, (2016) a montré que l'utilisation potentielle d'une stratégie couche par couche pour développer des films antimicrobiens LDPE revêtus de nanoparticules d'argent pour les applications d'emballage a le potentiel d'être utilisée comme méthode de revêtement contenant des AgNP antimicrobiens et que les films fabriqués pourraient être appliqués en tant qu'emballage antimicrobien.

Le chercheur Li, Du College of Food Science and Engineering, Nanjing University of Finance & Economics, en Chine, et ses collègues (2017) ont synthétisé les films d'emballage antimicrobien nanoargent (ANP) en mélangeant du polyéthylène et une poudre Ag / TiO₂ (nanotitane) hautement dispersée pour un stockage du riz à 37 °C

et une humidité relative de 70%. Les films ANP ont été caractérisés par une diffraction des rayons X et une migration de l'argent. L'activité antimicrobienne des films a été évaluée sur *Aspergillus flavus* (A. flavus) par microscope électronique à balayage et le nombre total de plaques, et la qualité de stockage du riz a été évaluée par un analyseur de texture et un analyseur de viscosité rapide. Les résultats montrent que l'ANP a eu un effet très bénéfique sur les propriétés physico-chimique par rapport aux emballages PE normaux. Pendant le stockage de 35 jours, la migration de l'argent vers le riz n'était pas évidente. Une population microbienne inférieure est observée sur ANP qui devrait être attribuée à la présence d'Ag / TiO₂. En outre, le riz emballé par ANP montre une qualité accrue en ce qui concerne la texture et le collage des propriétés. Selon cette étude, l'ANP semble être un matériau d'emballage prometteur pour le stockage du riz.

IV.2.2 Le dioxyde de titane

Les nanoparticules de dioxyde de titane (TiO₂), utilisées dans les emballages de plastique (Bergeron, 2014), ont de multiples capacités; «elles bloquent les rayons UV puis utilisent l'énergie de ces rayons pour dégrader certains composants de la paroi entourant les micro-organismes» (Adam, 2013). On les retrouve dans les crèmes solaires, les peintures, les encres d'imprimante et des recherches sont en cours pour leur utilisation dans les emballages alimentaires (op. cit.). La plus grande crainte des industriels c'est la présence d'oxygène dans les emballages, présence susceptible de provoquer la détérioration rapide de l'aliment (noircissement des fruits, odeurs ou saveurs indésirables, qualité nutritionnelle réduite) et de faciliter la croissance des micro-organismes. Le TiO₂ permet, ainsi, d'améliorer la conservation de l'aliment, en éliminant le dioxygène présent lors de l'emballage du produit (Adam, 2013 ; Bergeron, 2014).

IV.2.3 Les Nanotubes de carbone

Les nanotubes de carbone qui ont la capacité d'améliorer la résistance des emballages peuvent également avoir des propriétés antibactériennes (Adam, 2013). Par exemple, de minuscules pointes très fines percent la cellule microbienne et entraînent des dommages irréversibles chez les bactéries. Adam (2013), souligne aussi qu'«ils sont toutefois encore peu utilisés, car ils seraient également capables de percer les cellules humaines en cas de contact direct ».

IV.3 Ampleur, diversité des applications et enjeux

Les connaissances scientifiques sur les interactions (physiques et moléculaires) des nanoparticules semblent encore bien insuffisantes. Selon Souza *et al* (2016), ni les scientifiques ni les utilisateurs de ces nanoparticules ne semblent maîtriser les propriétés spécifiques de celles-ci (Sebbane, 2010). Or, le secteur de l'emballage alimentaire semble constituer l'une des zones les plus actives de recherche et de développement de la nanoscience (Duncan, 2011) entraînant de forts investissements de la part des industriels, mais aussi des gouvernements (von Lowis, 2012). Bien que la nanoscience dans l'emballage alimentaire offre des possibilités prometteuses (Netpak, 2015 ; FAO/OMS, 2011) les risques des nanomatériaux utilisés dans l'emballage alimentaire sont encore largement méconnus et leurs impacts potentiels sur la santé humaine et sur l'environnement sont de plus en plus une source de préoccupation (Netpak, 2015).

Il faut aussi relever l'insuffisance des mécanismes d'évaluation et de réglementation pour encadrer leur diffusion, car ils ne prennent pas en compte leurs propriétés spécifiques (FAO/MOS, 2011). La mise en marché des nano-emballages est enrobée par le discours publicitaire des firmes. Dans ce contexte, l'information crédible et

indépendante sur ces produits est pratiquement réduite à sa plus simple expression (Berge, 2013) et ne permet pas aux consommateurs de prendre en compte leurs risques et leurs effets avérés. Or, la diffusion de l'information est non seulement légitime, mais aussi essentielle pour permettre aux consommateurs de faire des choix responsables. Le parlement européen dépeint cette importante lacune et souligne la nécessité d'informer le public sur la présence des nanoparticules dans les produits de consommation (CSRT, 2009). Enfin, la mise en marché des nanoparticules se fait dans un contexte de très faible réglementation, si bien que les producteurs ne sont pas obligés d'effectuer des évaluations et d'en publier les résultats (Maniet, 2010).

IV.4 Risques pour l'environnement des nano-emballages

La réduction de l'impact environnemental des activités industrielles est devenue un enjeu politique et social majeur. L'emballage cristallise cette demande et se retrouve au centre de controverses. Les consommateurs voient de plus en plus l'emballage comme un déchet, une gêne et perdent de vue souvent les fonctions remplies par l'emballage (Tissandié et Knapp, 2009). La gestion de la grande quantité de matières résiduelles provenant des emballages est une préoccupation constante. Selon l'Environnementale Protection Agency (2011), en 2010, les plastiques représentaient 31 millions de tonnes aux États-Unis soit l'équivalent de 12,4 % de tous les déchets municipaux. Au Québec, seuls 32,6 % des matières plastiques avaient été récupérées par les ménages pour la même année (Lapointe, 2012). La plupart des catégories de matières plastiques enregistrées étaient en lien avec les emballages alimentaires (op. cit.).

Selon les Amis de la terre (2014), « le marché mondial des nanomatériaux est estimé à environ 11 millions de tonnes », le nanoargent et le nanotitane sont les plus utilisés dans l'alimentation et les matériaux en contact avec les aliments. La forte proportion

des emballages alimentaires dans les déchets totaux générés conjuguée à l'insuffisance de récupération et de recyclage pourrait accroître les dégâts sur l'environnement et sur la santé humaine liés à l'utilisation grandissante des nanoparticules dans les emballages alimentaires. Une fois, rejetées dans l'environnement les propriétés particulières des nanoparticules peuvent engendrer des effets indésirables (O'Brien et Cummings, 2011). En outre, les nano-emballages subissent le même itinéraire des déchets alimentaires et se retrouvent dans les sacs poubelles sans traitement spécifique (Tchangna, 2008).

L'usage inconditionné des nanomatériaux (nanoargent et matériaux antimicrobiens) dans l'agroalimentaire est inquiétant. Comme le mentionne le Comité scientifique de la Commission européenne (2011), l'activité bénéfique des nanoparticules d'argent (agents antimicrobiens) pourrait suite à leur utilisation accrue mettre en danger les communautés microbiennes dans l'environnement et perturber l'équilibre existant générant des problèmes sanitaires divers.

Melhus (2007), cité dans les Amis de la terre, 2014, ajoute que l'utilisation abondante de produits antimicrobiens pourrait renforcer la résistance des populations de bactéries pathogènes. La présence dans les flux de déchets des nanoparticules antibactériennes pourrait perturber le fonctionnement des bactéries bénéfiques dans l'environnement comme les bactéries qui agissent sur la nitrification et la dénitrification dans les eaux douces et l'environnement marin (Oberdörster *et al.*, 2005, cité dans les Amis de la terre, 2014). Toute perturbation de ces processus pourrait avoir de graves conséquences sur le fonctionnement et la performance de l'ensemble des écosystèmes.

Les déchets des nano-emballages alimentaires peuvent avoir des conséquences sur les écosystèmes aquatiques. Plusieurs études toxicologiques effectuées sur les truites arc-en-ciel, les algues et les puces d'eau, ont montré que le dioxyde de titane est très

toxique pour divers organes et peut provoquer de la détresse respiratoire et des perturbations biochimiques (Hund-Rinke *et al.*, 2006; Lovern *et al.*, 2006; Federici *et al.*, 2007, cité dans les Amis de la terre, 2014). Bondarenko *et al.* (2013) ajoutent que les nanoparticules d'argent, de cuivre et de zinc utilisées dans le secteur agroalimentaire sont extrêmement toxiques pour les organismes aquatiques comme les poissons, les algues et les crustacés.

L'Anses s'est intéressée particulièrement aux effets des nanotubes de carbone sur les micro-organismes, les organismes aquatiques et les végétaux (Anses, 2012: 24). Chung *et al.* (2011) ont étudié les effets à court terme des nanotubes de carbone (NTC) sur l'activité et la biomasse de micro-organismes vivants dans deux sortes de sols (graminées ou conifères) et contaminés expérimentalement par des nanotubes de carbone multiparois (MWCNT) (15,1 nm, 15 parois) à 3 concentrations (50, 500 et 5 000 µg/g de sol) (Chung, 2011; cite dans Anses, 2012). Les résultats suggèrent que des concentrations de 5 000 µg de MWCNT par gramme de sol peuvent exercer une activité antimicrobienne et affecter les cycles des nutriments auxquels participent les microorganismes (Anses, 2012: 24)¹⁷.

Selon toujours l'Anses (2012)

Une revue de Petersen *et al.* (2011) sur l'écotoxicité des NTC chez différentes espèces terrestres, sédimentaires et aquatiques a montré qu'en dépit des effets toxiques observés, il ne semble pas y avoir d'absorption des nanotubes de

¹⁷ D'après Petersen, les deux fortes doses sont supérieures à celles probablement présentes dans l'environnement (Petersen *et al.*, 2009). Un traitement à l'acide nitrique (HNO₃) des NTC a permis de disposer d'une solution aqueuse de MWCNT pour contaminer les sols et augmenter la dispersabilité des nanotubes de carbone. Différentes activités enzymatiques (phosphatase, 1,4-β-N-acétyl glucosaminidase, 1,4-β- glucosidase, cellobiohydrolase, xylosidase) qui jouent un rôle clé dans la décomposition microbienne de la litière ont été mesurées après 30 minutes, 1, 4 et 11 jours de contamination des sols. La biomasse bactérienne a été évaluée par mesure du carbone et de l'azote organique. Une réduction de l'activité enzymatique et de la biomasse microbienne a été généralement observée dans les deux types de sols présentant des caractéristiques physico-chimiques différentes et contaminés par les MWCNT aux concentrations les plus élevées (5 000 µg/g de sol) dès 30 min de contamination et jusqu'à la fin de l'étude (11 jours) (Anses, 2012: 24).

carbone (NTC) au travers des membranes épithéliales. Aussi, en l'absence d'absorption, la toxicité ne peut être attribuée qu'aux effets de ces NTC exercés à la surface des organismes. La toxicité des suspensions aqueuses de NTC varie considérablement selon les organismes (amphibiens, daphnies, poissons) et cette variabilité peut être une conséquence des différences de l'impact des NTC au niveau des surfaces épithéliales selon les organismes (Anses, 2012: 27)¹⁸.

Les risques des nanotechnologies pour l'environnement sont donc extrêmement difficiles à quantifier. Comme le souligne les Amis de la Terre (2014), les risques écologiques associés à la nanotoxicité demeurent très peu compris suscitant dès lors une difficile gestion et obligeant à l'urgente nécessité de recherches complémentaires. Et, rajoutent Souza *et al* (2016), les études sur l'écotoxicité des bionanocomposites pour les appareils alimentaires sont rares et nécessaires pour évaluer leur impact sur l'environnement.

IV.5 Risques pour la santé humaine des nano-emballages

Le risque de l'utilisation des nanoparticules dans l'emballage alimentaire est l'assimilation de ces éléments par l'organisme humain après la consommation et la digestion. La taille des nanoparticules est déterminante dans leur déplacement dans l'organisme (Bolis, 2013). Garnett et Kallinteri (2006) reconnaissent dans leur étude que les nanoparticules dont le diamètre est de 300 nm ou moins peuvent être absorbées par les cellules. Il en est de même des nanomatériaux de moins de 70 nm qui peuvent être repris par le noyau cellulaire où ils peuvent provoquer des dommages importants (Chen et von Mikecz, 2005; Geiser *et al.*, 2005). Plusieurs

¹⁸ Par exemple, chez des daphnies exposées à des fullerènes, l'accumulation des NTC à la surface des organismes peut entraver sa nage (effet indirect) (Lovern *et al.*, 2007). Des effets écotoxicologiques minimes (e.g. sur la mortalité, la croissance et l'éclosion) ont été généralement rapportés à la suite d'expositions d'organismes du sol (*Eisenia fetida*, *Lumbricus variegatus*) à des NTC (Anses, 2012: 27)

études IRSST, 2006; Ostiguy *et al.*, 2008 ; NIOSH, 2012 cité dans IRSST, 2014; Bolis, 2013) montrent que les nanoparticules peuvent interférer avec le système immunitaire et franchir les barrières de protection physiques pour pénétrer dans les vaisseaux sanguins, dans le système lymphatique et dans divers organes (cœur, poumons, reins, système reproducteur, etc.).

Une étude de (Hillyer et Albrecht, 2001) et citée par la FAO/OMS, (2008) réalisée sur des souris démontre que:

Lors de l'administration de particules d'or (Au-NP) (58, 28, 10 et 4 nm) à des souris, la distribution dans les organes augmentait à mesure que diminuait la taille des particules (Hillyer and Albrecht, 2001). Si l'on tient compte de la surface de contact plutôt que de la masse, l'effet de la petite taille est encore plus important. Les plus petites particules ont été retrouvées dans les reins, le foie, la rate, les poumons et le cerveau alors que les plus grandes sont presque entièrement restées dans l'appareil digestif. Une forte absorption de 7 pour cent de nanomatériaux manufacturés en polystyrène marqué (50 nm) a été découverte dans un composite de foie, de rate, de sang et de moelle osseuse (Jani *et al.*, 1990). La stabilité du marquage n'a toutefois pas été corrigée (FAO/OMS, 2011: 32).

Causant alors à des degrés divers, des dysfonctionnements. L'Institut Fédéral pour l'évaluation des Risques (IFR) (2010) confirme aussi ce résultat. L'IRSST (2014) rajoute aussi:

Globalement, la littérature scientifique concernant les données toxicologiques liées spécifiquement aux NPs demeure limitée, mais préoccupante. En effet, il en ressort que, de façon générale et à masse égale, une NP sera souvent plus toxique que le même produit chimique dont les particules sont de plus grande dimension (IRSST, 2014, p. 2).

Certains rapports ont indiqué que les nanoparticules d'argent peuvent endommager les cellules humaines en modifiant la fonction des mitochondries (Song *et al.*, 2011). Les Amis de la terre (2011, p.13) soulignent que les nanoparticules d'argent utilisées dans l'emballage alimentaire peuvent avoir des effets toxiques plus importants sous

leur forme nanométrique que sous leur forme colloïdale ou conventionnelle et ajoutent qu'une utilisation généralisée du nanoargent dans les produits de consommation aggraverait davantage le problème des supermicrobes résistants aux antibiotiques.

Les niveaux d'exposition actuelle à ces nanoparticules restent inconnus et peuvent nuire à la santé humaine et à l'environnement (Bumbudsanpharoke et Ko, 2015). Ainsi, Hoet *et al.* (2004) ainsi que Oberdorster *et al.* (2005) incitent donc à une régulation et à une limitation de ces applications aux aliments jusqu'à ce qu'une compréhension plus approfondie du comportement biologique des nanomatériaux soit clarifiée.

Il est important, voire nécessaire, d'évaluer les risques de toxicité des emballages alimentaires contenant des nanoparticules. C'est dans cette même veine que la Commission de l'éthique en science et en technologie rappelle aux gouvernements « qu'ils ont la responsabilité de veiller à la protection de l'environnement, de la santé humaine et du bien-être de la collectivité en général » (CEST, 2011). Car actuellement, le consommateur ne peut pas assumer seul la lourde tâche de « rassembler toute l'information pertinente et nécessaire pour décider des risques alimentaires qu'il est prêt à prendre et de ceux qu'il veut éviter » (FAO, 2002).

IV.5.1 Migration des nanoparticules dans les denrées alimentaires

La migration vers les denrées alimentaires est un processus de transfert de masse par lequel des constituants de faible masse moléculaire présents dans l'emballage sont libérés dans les denrées alimentaires (Huang, Li et Zhou, 2015 cité dans Souza, 2016). L'une des étapes les plus importantes lors du développement de nouveaux matériaux qui seront en contact direct avec les aliments est la recherche de la

migration potentielle afin d'étudier si des substances indésirables ou même toxiques migrent vers le produit emballé (Souza, 2016). Ces tests de migration ont des limites qui sont établies par le règlement européen (Commission européenne, 2011). Selon la Commission européenne (2011),

La limite de migration spécifique correspond à la quantité maximale d'une substance qui est autorisée dans les denrées alimentaires, le but étant que le matériau destiné à entrer en contact avec des denrées alimentaires ne présente pas de risque pour la santé. Le fabricant doit garantir que les matériaux et objets qui ne sont pas encore en contact avec des denrées alimentaires respecteront ces limites lorsqu'ils seront mis en contact avec des denrées dans les pires conditions de contact prévisibles. Par conséquent, la conformité des matériaux et objets qui ne sont pas encore en contact avec des denrées alimentaires doit être évaluée, et des règles doivent être fixées pour la réalisation des essais (Commission européenne, 2011, p26).

Théoriquement, les nanoparticules ont le potentiel de migrer vers les produits alimentaires emballés, mais les évaluations des risques ne sont toujours pas concluantes (Souza *et al.*, 2016). Les interactions entre les matériaux desdits emballages et les aliments peuvent entraîner un phénomène de migration de matières. Il est déjà prouvé que dans les emballages alimentaires conventionnels les polymères et les additifs chimiques (Bisphénol A, les phtalates) ont la possibilité de migrer de l'emballage vers les produits alimentaires (Amis de la Terre, 2014). Il en résulte d'une part l'incorporation des nanoparticules dans les aliments destinés à la consommation (Ostiguy *et al.*, 2008). D'autre part, l'absorption de certains constituants des aliments par les emballages (PIP/COLEACP, 2011) Peut détériorer alors la qualité des aliments et donc leur ingestion peut entraîner des troubles divers chez l'humain. Les sujets de préoccupation restent le potentiel et l'ampleur de la migration de ces nanoparticules et leur degré de toxicité (FAO/OMS, 2011; Bumbudsanpharoke et Seonghyuk, 2015).

Dans le secteur émergeant des nanoemballages, il n'y a pas beaucoup d'études, sur les migrations, dans la littérature (Huang *et al.*, 2015). Cette faible disponibilité des études s'explique par les difficultés à caractériser les nanoparticules dans les composites et le manque de méthodes d'analyse qualitative et quantitative (Souza *et al.*, 2016). Il est vrai que le domaine des nanoemballages est relativement nouveau.

De plus, dans ce domaine alimentaire, une seule technique d'évaluation n'est pas suffisante pour fournir toutes les informations. Des procédures de fractionnement supplémentaires et des méthodologies de détection combinées sont nécessaires (Huang *et al.*, 2015 ; Störmer *et al.*, 2017). Dans les échantillons plus complexes, tels que les denrées alimentaires, la combinaison de plusieurs techniques sont fortement recommandées, et devraient comprendre au minimum la microscopie (microscopie à force atomique (AFM), électron à balayage (SEM) et microscopie électronique à transmission (TEM), la chromatographie, la spectroscopie, la centrifugation, ainsi que la filtration et les techniques connexes) (Duncan, 2014).

Hannon *et al.*, (2016) ont examiné l'exposition humaine aux nanoparticules d'argent (AgNP) et celles du cuivre (CuNP). Ces dernières sont incorporées dans l'emballage alimentaire d'un «acidic food simulant». Ils ont remarqué une migration significativement plus faible pour l'Ag (0,46 mg / kg de nourriture) par rapport au Cu (0,82 mg / kg de nourriture) ». De plus, «aucune population distincte d'AgNP ou de CuNP n'a été observée dans 3% de HAc par analyse de suivi des nanoparticules (NTA) et microscopie électronique à transmission (TEM). Ils ont calculé la marge d'exposition (Margin Of Exposure MOE) du (AgNP) et du (CuNP) et le MOE calculé suggère que les limites de migration actuelles peuvent être conservatrices pour les applications particulières de nano-emballage.

Echegoyen et Nerín, (2013) ont étudié la migration des nanoparticules d'argent et d'autres nanoparticules, dans trois conteneurs commerciaux en plastique. La

migration de l'argent a été observée pour tous les échantillons étudiés. La taille et la morphologie des nanoparticules d'argent ont changé pour les différents échantillons et la migration d'autres matériaux nanos a également été confirmée. Selon Cushen *et al.*, (2012), le taux de migration d'un système augmente lorsque la taille des nanoparticules et la viscosité dynamique du polymère diminuent.

D'autres études ont prouvé que les nanoparticules incorporées dans les emballages alimentaires ne migrent pas vers les aliments. Bott *et al* (2014) ont étudié la migration de deux types de nanotubes de carbone incorporés dans un polyéthylène basse densité (LDPE) et un polystyrène (PS). Les résultats expérimentaux suggèrent que les particules de carbone noir, une fois incorporées dans le LDPE ou le PS, ne migrent vers la nourriture. Selon ces auteurs, ces observations peuvent être généralisées et étendues à d'autres plastiques de contact alimentaire dans lesquels les particules du carbone noir sont complètement intégrées.

Une autre étude réalisée par Avella *et al.* (2005) sur la migration des particules nano couches vers des légumes emballés avec des films biodégradables d'amidon / argile, a montré que la migration globale était conforme aux réglementations et aux directives européennes (Commission européenne, 2007).

Il est donc nécessaire de poursuivre les recherches dans ce domaine afin de déterminer si les nanoparticules ou du moins si certaines nanoparticules peuvent ou non migrer vers les aliments emballés. Une recommandation appuyée par Ramachandraiah *et al.*, (2014) suggère que pour le succès de la nanotechnologie dans le secteur alimentaire, les problèmes liés à l'acceptation du public, l'économie et la régulation des aliments transformés avec des nanomatériaux susceptibles de persister, d'accumuler et de conduire à la toxicité doivent être abordés. Ils ajoutent que les effets à long terme sur la santé humaine et l'environnement en raison de la migration des nanomatériaux à partir de l'emballage doivent être étudiés davantage. L'avenir de

la nanotechnologie dépend des rôles joués par les gouvernements, les organismes de réglementation et les fabricants pour relever les défis liés à l'application des nanomatériaux dans les aliments.

Les bénéfices engendrés par les activités de production occultent souvent les impacts négatifs de celles-ci sur la santé humaine et sur l'environnement. La composition des nano-emballages par exemple, peut affecter la sécurité et la santé des humains par le transfert de composantes NPs dans des aliments de consommation (CNE, 2010 : s.p), ce qui a suscité au cours des dernières années, certaines controverses dans les médias. Cependant, les impacts des nanoemballages sur l'environnement et sur la santé humaine demeurent relativement peu connus du grand public et font l'objet d'un intense débat parmi les divers acteurs (scientifiques, industriels, décideurs, militants écologistes). Le Conseil National de l'Emballage (CNE) distingue deux (2) principaux risques liés aux nanoemballages soient:

✓ La contamination

Elle concerne tous les produits ayant une activité biologique et ces derniers sont susceptibles d'entraîner une contamination plus ou moins dangereuse.

✓ La pollution

Les produits chimiques résiduels dans les emballages gardent leurs propriétés intrinsèques qui peuvent être polluantes. De plus, certains produits chimiques peuvent migrer dans la paroi du contenant et la polluer définitivement.

IV.5.2 Toxicité des nano-emballages

Selon Maisanaba *et al.*, (2015) l'ingestion des aliments emballés avec des matières à base de nanoparticules serait la source d'exposition la plus importante.

La toxicité des nanoparticules dépend de leur concentration et de divers paramètres (taille, morphologie, composition chimique, stabilité, milieu, taux de migration et de l'ingestion des particules) (Cushen *et al.*, 2012; Souza *et al.*, 2016).

Selon Souza *et al.*, (2016), les particules les plus petites sont généralement absorbées plus facilement que les plus grandes, puis distribuées rapidement dans les organes où elles peuvent endommager les cellules. Lee *et al.*, (2017) ont étudié la solubilité, l'absorption orale, la distribution des tissus et la cinétique d'excrétion de l'un des additifs alimentaires les plus utilisés, de la silice (SiO₂), évaluées par rapport à la taille des particules (nano vs volume) après une dose unique par voie orale administrée aux rats. Les résultats obtenus montrent que l'absorption orale de nanoparticules ($3,94 \pm 0,38\%$) était supérieure à celles des matériaux à l'échelle micrométrique ($2,95 \pm 0,37\%$), probablement due au transport intestinal par des cellules microfocales. D'autre part, la taille des particules n'a pas eu d'effet significatif sur la propriété de dissolution *in vivo*, la biodistribution ou la cinétique d'excrétion. Le profil d'absorption orale des nanoparticules de silice dépendait fortement de la présence de sucre (prédominance pour le glucose) ou de protéines, montrant un taux d'absorption rapide dans le glucose, vraisemblablement en raison de leur interaction superficielle sur les nanoparticules. Ces résultats peuvent être utiles pour prédire la toxicité potentielle des nanoparticules de Silice alimentaires et pour la compréhension de leurs interactions biologiques.

Les études de Poland *et al.*, (2008) sur des souris ont démontré que les nanotubes de carbone injectés dans la cavité péritonéale des animaux ont causé un comportement toxique analogue à l'amiante. Les auteurs concluent qu'en exposant la doublure

mésothéliale de la cavité corporelle des souris, en tant que substitut de la couche mésothéliale de la cavité thoracique, les longs nanotubes de carbone multicouches entraînent un comportement pathogène analogue à l'amiante. Cela inclut l'inflammation et la formation de lésions connues sous le nom de granulomes. Cela revêt une importance considérable, car les entreprises continuent d'investir lourdement dans les nanotubes de carbone pour une large gamme de produits en supposant qu'ils ne sont pas plus dangereux que le graphite.

Dans l'étude in vitro de Corradi et al. (2011),

Le test du micronoyau a été appliqué à plusieurs nanoparticules, avec pour objectif de déterminer l'effet du sérum présent dans les milieux de culture des cellules de carcinome pulmonaire humain les A549. Les concentrations en MWCNT employées allaient de 50 à 250 µg/mL. Les auteurs n'ont pas été en mesure d'obtenir de résultat avec ces MWCNT, en raison de la formation d'agglomérats qui gênaient l'observation en microscopie optique, quelle qu'ait été la méthode de préparation des MWCNT, avec ou sans sérum. Toutefois, les auteurs ont noté que la morphologie des cellules n'était pas altérée par les nanotubes, quelle que soit la concentration en sérum. De même, l'indice de blocage de la prolifération (paramètre déterminé pour le test du micronoyau avec blocage de la cytokinèse) n'était pas modifié. Ces données indiquent que ces MWCNT n'ont pas provoqué de toxicité, dans les conditions expérimentales de l'étude (Anses, 2012, p.11-12)

Van der Zande et al. (2011) ont publié une revue analysant 7 études in vivo de toxicité induite par administration pulmonaire de nanotube de carbone. D'après les auteurs:

Les effets systémiques et cancérogènes d'une exposition à des NTC par inhalation restent à démontrer du fait du faible nombre d'études publiées, qui plus est présentant des résultats contradictoires, et de l'absence d'étude de cancérogenèse à long terme par inhalation (Van der Zande et al., 2011). En effet, sur les deux études visant à étudier le potentiel cancérogène des MWCNT chez le rongeur, l'une n'a pas observé de formation de mésothéliome, alors que l'autre décrit l'apparition de tumeurs. Toutefois, le modèle expérimental choisi dans cette dernière étude est controversé (souris

invalidés pour p53 et forte dose de NTC injectée). Les auteurs soulignent que le mode de contamination est également important, l'inhalation semblant induire une inflammation locale plus importante qu'une administration oropharyngée (AOP). Les MWCNT semblent également provoquer des mésothéliomes par injection intrapéritonéale (Anses, 2012, p.18-19).

Les résultats de ces études suggèrent la nécessité d'approfondir les recherches et d'avoir une grande prudence avant d'introduire de tels produits sur le marché, sachant qu'un nombre grandissant de produits nanos sont déjà introduits sur le marché.

Watson *et al.*, (2015) ont étudié les effets des nanoparticules d'oxyde de zinc (ZnONP) sur le foie et les cellules de Kupffer après administration par voie intraveineuse. Ils ont constaté que le foie était le principal site d'absorption initiale de ZnONP. L'administration de ZnONP a inhibé de manière transitoire la motilité phagosome des cellules de Kupffer et une lésion hépatocytaire plus tard induite. La diminution du mouvement de l'organelle cellulaire de Kupffer était en corrélation avec une lésion hépatique induite par les nanoparticules de ZnO.

IV.6 Conclusion du Chapitre VI

Le débat est toujours en cours chez les chercheurs quant à l'étendue de la migration des nanoparticules incorporées dans l'emballage alimentaire vers les denrées et donc quant aux enjeux de sécurité. Il importe donc que les agences gouvernementales et les parties prenantes déterminent dans les plus brefs délais les limites d'utilisation et mettent en oeuvre lois et règlements pertinents afin d'éviter que les emballages nanoalimentaires aient des impacts importants sur la santé humaine. Dans le chapitre V, nous allons explorer le rôle de l'industrie, des différents acteurs ainsi que l'encadrement législatif des nano-emballages.

CHAPITRE V

ACTEURS, ENJEUX ET ENCADREMENT DU NANOEMBALLAGE

Au plan international, national, régional et local les acteurs incluent les organisations qui fabriquent ces nanoemballages, à savoir les industriels et toute la chaîne de recherche en amont de la production, ainsi que les pouvoirs publics, instances internationales et nationales qui jouent un rôle clé dans le soutien à la recherche et développement et dans l'évaluation de ces nanotechnologies. S'ajoutent à ce deux grands acteurs, mais cette fois avec des pouvoirs bien limités, les groupes de recherche et de réflexion et les ONG, ainsi que certains scientifiques critiques de même que l'ensemble des organismes de protection de l'environnement, des travailleurs (syndicats) et des consommateurs, et enfin un certain nombre de citoyens, touchés par les applications de la nanotechnologie dans le secteur agroalimentaire (FAO/OMS, 2011).

V.1 Industries de nano-emballages

Les applications de la nanotechnologie dans l'industrie alimentaire augmentent sans cesse même si cette technologie en 2011 était encore émergente selon Blasco et Pico (2011) et bien que Neethirajan et Jaya (2011) estimaient déjà à plus de 400, le nombre d'entreprises développant ces applications dans l'industrie des emballages alimentaires dans le monde. Des multinationales du secteur agroalimentaire telles que

Kraft, Budweiser et Pepsi mènent des projets de recherche et de développement pour l'application des nanotechnologies dans le secteur des emballages alimentaires et des boissons (Yezza, 2013). Le rapport de Persistence Market Research (2013) estimait le marché global des nano-emballages alimentaires à 6,5 milliards de dollars US avec une prévision de croissance à un taux annuel de 12,7 % pour atteindre environ 15 milliards de dollars US à l'horizon 2020. Aussi, l'Institut européen pour la santé et la protection des consommateurs estime que l'utilisation des nanomatériaux dans l'emballage alimentaire devrait atteindre 20 milliards de dollars US en 2020 (Bumbudsanpharoke et Ko, 2015). Cette utilisation, en nette augmentation, soulève des inquiétudes de toutes sortes.

V.2 Tendances de l'industrie du nano-emballage alimentaire

Les possibilités offertes par les nanomatériaux sont très vastes. Bien que la nanotechnologie représente une opportunité significative pour les industriels sur le plan économique, elle soulève un certain nombre de questionnements d'ordre sanitaire, environnemental, éthique, politique et réglementaire. Ces préoccupations émergent même des caractéristiques intrinsèques des nanoparticules, petite taille, propriétés de surface, état quantique, agrégation, migration, mutation, création des radicaux libres, etc. (Tchangna, 2008).

Ce marché se développe à grande vitesse avec de nouvelles applications qui, en dépit de leur intérêt potentiel, peuvent être boudés par les consommateurs si, en raison du manque de réglementation ces produits avaient des impacts négatifs pour les humains ou l'environnement. (Amrouche 2012). Toutefois, en l'absence de réglementation claire et d'infrastructures pour soutenir les nouvelles technologies, les individus seront exposés à leur insu à des risques potentiels, comme l'on a vu dans le chapitre IV. D'où, souligne le rapport de la réunion d'experts de la FAO et de l'OMS de 2011,

la nécessité de développer un emballage performant dans un contexte durable et sécuritaire.

V.3. Organisations professionnelles

Parmi les associations professionnelles du secteur de l'alimentation, on peut retenir l'Association européenne de l'industrie alimentaire et des boissons (UE), la Confédération des industries agroalimentaires de l'UE (CIAA), l'AFGC (Australie), la Groceries Manufacturers Association (États-Unis) et le Food Industry Center (Japon) (FAO/OMS, 2011). Ces associations servent «d'interlocutrices lors des échanges entre les autorités publiques et l'industrie ou entre les organisations de consommateurs, les ONG environnementales et l'industrie» (FAO/OMS, 2011, p. 48-52). Selon le rapport de la réunion des experts de la FAO/OMS de 2011, ces associations industrielles auraient pour rôle d'exposer les points de vue des industries sur les réglementations existantes ou proposées afin de fournir un moyen à l'industrie de s'exprimer sans mettre en péril l'image d'une entreprise en particulier. En outre, elles jouent le rôle de coordinatrices de projets communs (op. cit.).

V.4. Consommateurs

Pour la FAO et l'OMS (2011), il est impérieux de comprendre la perception des consommateurs afin d'anticiper les préoccupations concernant l'utilisation de la nanotechnologie dans l'alimentation et dans les emballages alimentaires. Dans cette perspective, plusieurs études ont été effectuées en Europe et en Amérique du Nord ayant pour objectif d'estimer les connaissances du public sur la nanotechnologie ainsi que les avantages et les risques associés à celle-ci pour la société (op. cit.). Ces études ont, en général, montré un niveau de connaissances relativement faible des

aspects techniques relatifs aux nanotechnologies chez les consommateurs (Lee *et al.*, 2005; Siegrist *et al.*, 2008, Fischer *et al.*, 2012 cités dans Zhao *et al.*, 2016). Alors que les organisations gouvernementales telles que l'EFSA et la FDA ont reconnu certains aspects bénéfiques de la nanotechnologie, elles ont également admis le manque de connaissances sur les effets de la nanotechnologie sur la santé humaine et environnementale (EFSA, 2009; FDA, 2007). Les deux préoccupations devraient avoir une influence notable sur les décisions d'achats des consommateurs.

Le manque d'informations claires diminue la confiance des consommateurs et compromet l'acceptation de nouveaux nanoproducts (Zhao *et al.*, 2016), ce qui incite à explorer l'attitude des consommateurs vis-à-vis, par exemple, les informations sur les nano-emballages des produits alimentaires et leur influence sur l'acceptation des nanotechnologies, et en particulier des produits alimentaires nano-emballés (*ibid.*). Cependant, actuellement, les consommateurs ne peuvent toujours pas savoir si des produits contiennent des nanomatériaux ni connaître leurs impacts potentiels sur la santé humaine et l'environnement. Toutefois, les études réalisées en Europe ont révélé des attitudes plutôt négatives de la part des consommateurs (BFR, 2006; Gavelin *et al.*, 2007; Hanssen et Van Est, 2004; Kleinmann et Powell, 2005 ; Siegrist *et al.* 2007; Swiss, 2006 cité dans FAO/OMS, 2011).

Une équipe de l'INRA (2011) composée d'économistes et de sociologues français et allemands ont analysé le comportement des consommateurs de ces deux pays vis-à-vis de deux nanoproducts alimentaires: nanofortification avec vitamines et nano-emballages. Les résultats montrent que de nombreux consommateurs dans les deux pays sont réticents à accepter les nanotechnologies dans les aliments. Étant confrontés à des informations générales sur les nanotechnologies, les résultats révèlent que les consommateurs français sont plus réticents à accepter le nano-emballage, tandis que les consommateurs allemands sont moins enclins à accepter la nanofortification par rapport à l'autre application relative à des vitamines. Des informations plus détaillées

sur les nanotechnologies ont un impact négatif lorsque l'accès aux informations pertinentes est assuré (Bieberstein *et al.*, 2013).

Zhou, doctorant en philosophie de l'université de Kentucky, (2013), un certain nombre d'enquêtes ont porté sur la compréhension et l'acceptation de la nanotechnologie du public américain en général. En utilisant des données d'enquête sur l'expérience de choix, les consommateurs étaient prêts à payer 0,95 \$ de moins pour une bouteille typique (48 oz) d'huile de canola si elle était produite à partir de particules à l'échelle nanométrique; 0,51 \$ de moins si les produits finaux étaient emballés avec une technique d'emballage améliorée par la nanotechnologie.

La FAO et l'OMS (2011) estiment qu'une éducation des consommateurs peut mener à une compréhension large des applications de la nanotechnologie sans entraîner nécessairement des impressions plus favorables. Dans le secteur de l'agroalimentaire, les consommateurs désirent être informés des risques et des avantages potentiels des applications de la nanotechnologie. En l'absence d'avantages clairs, peu de consommateurs manifestent une opinion positive et ils sont encore moins disposés à acheter des produits alimentaires prétendument « améliorés » par la nanotechnologie, selon le rapport de la réunion d'experts de la FAO et l'OMS (2011).

V.5 Gouvernements

Les pouvoirs publics sont des parties prenantes importantes. Le gouvernement est le responsable principal de la sécurité et du bien-être des consommateurs, de l'environnement et des autres intérêts du public. Ces autorités jouent aussi un rôle économique important de soutien aux avancées de la science et de la technologie. C'est pourquoi les autorités publiques doivent à la fois soutenir, mais également évaluer et surveiller le développement responsable des nouvelles technologies selon

la FAO et l'OMS (2011) incluant la nanotechnologie appliquée à l'industrie alimentaire.

Le gouvernement doit également s'assurer que les intérêts et les préoccupations des autres parties prenantes soient écoutés et pris en considération lors de la conception et de la mise en œuvre des politiques. Ces rôles divers incluent les composantes législative et exécutive. En outre, les organisations gouvernementales internationales telles que la FAO, l'OCDE, l'OMS, etc., et des organismes gouvernementaux supranationaux comme UE, etc. doivent se servir de leurs moyens et de leurs instruments pour protéger les intérêts de leurs pays membres (op. cit.). Dans ce contexte, du moins au plan théorique, une coordination et une coopération efficace permettraient de mieux communiquer les avantages et les risques au sein des organisations gouvernementales, et d'encourager de véritables politiques et pratiques pour contrôler les développements des nanotechnologies, dans le secteur de l'agroalimentaire (FAO/OMS, 2011). Chaque gouvernement national, ajoute Bumbudsanpharoke *et al.*, (2015), devrait prendre des mesures pour la coopération internationale dans la poursuite d'un système d'alerte anti-nano-sécurité, car les nanoparticules pourraient bien être difficiles à détecter dans les produits emballés importés qui circulent d'un pays à l'autre.

.

V.6. Encadrement législatif et réglementaire

Il y a urgence pour les agences gouvernementales et les diverses autres parties prenantes, d'encadrer l'utilisation de la nanotechnologie par des lois et des règlements afin de limiter les effets délétères sur la santé humaine et l'environnement. En effet, selon Beaudoin (2016) :

La plupart des gouvernements des pays industrialisés ont largement contribué au développement du secteur des nanotechnologies. Or, paradoxalement la

majorité de ces gouvernements n'ont pas mis au point de cadres réglementaires et évaluatifs spécifiques pour ces substances. C'est le cas du gouvernement du Canada qui accuse un retard certain par rapport à plusieurs pays européens, notamment (Beaudoin, 2016, p. 96).

En France, à titre d'exemple, depuis novembre 2012 le Centre Technique de la Conservation des Produits Agricoles (CTCPA) travaille en partenariat avec le CEA (plate-forme nanosécurité) dans le cadre du projet Marina (Maîtrise des risques nanomatériaux) pour évaluer la sécurité des emballages contenant des nanomatériaux au bénéfice non seulement des consommateurs, mais aussi des opérateurs (Bumbudsanpharoke et Ko, 2015). Une approche de type hygiène industrielle, qui s'inscrit dans la logique de l'engagement pris par les autorités de mieux estimer les enjeux et prévenir les risques liés aux nanotechnologies¹⁹. L'ancienne législation française concernant les matériaux en contact avec les denrées alimentaires, datant de 2004 et «visait à s'assurer que tout matériau en contact avec les denrées alimentaires ne cause pas des réactions chimiques capables de modifier la composition ou les caractéristiques organoleptiques (le goût, la texture, l'apparence ou même l'arôme) de celles-ci» (CNA, 2009: 27). Par contre, le règlement (CE) n°1935/2004 a annulé l'ancienne législation pour permettre que les nouveaux emballages (actifs et intelligents) puissent être introduits sur le marché (ibid.).

V.6.1. Encadrement législatif et réglementaire en Europe

En Europe, le développement des nano-emballages (actifs et intelligents) est soumis à une réglementation stricte. Il est surtout conditionné par «la législation communautaire plus restrictive» que dans d'autres pays (Industrie et Technologies,

¹⁹ Sources: <http://www.industrie-techno.com/emballages-la-tendance-est-a-la-fonctionnalisation.22852>. Consulté le 05/06/2015

2013). Selon David Byrne, commissaire chargé de la santé et de la protection des consommateurs, a déclaré:

La législation communautaire doit s'adapter aux progrès technologiques réalisés dans le domaine de l'emballage des denrées alimentaires. Les matériaux actifs et intelligents doivent être autorisés en Europe s'ils respectent les principes de la législation alimentaire de l'UE. Le texte proposé étend encore notre approche de la sécurité « de la ferme à la table » de façon à permettre l'identification et la traçabilité de tout matériau manifestement destiné à entrer en contact avec des denrées alimentaires (CE, 2003, s.p.).

Les produits commerciaux existant dans le secteur de l'alimentation sont soumis au règlement-cadre 1831/2003/CE. Publié en 2004, ce règlement résulte des modifications apportées par la Commission européenne à la directive-cadre sur le contact alimentaire des matériaux 89/109/CEE et qui ne comprenait pas l'utilisation d'emballages actifs et intelligents (Industrie et Technologies, 2013). En vertu des règlements européens, sont définis comme actifs les matériaux et les objets destinés à prolonger, améliorer la durée de conservation ainsi qu'à maintenir l'état des produits alimentaires emballés adéquat à la consommation (Ministère de l'Économie, de l'Industrie et du Numérique, 2015).

Cette définition inclut les constituants qui libèrent ou absorbent délibérément des substances dans les aliments emballés ou dans leur environnement (Industrie et Technologies, 2013). Le règlement 450/2009/EC propre aux emballages actifs et intelligents signifie l'exigence de solliciter une estimation par l'autorité européenne de sécurité des aliments, de substance ou du mélange des matières (op. cit.). En 2009, pour évaluer les matériaux intelligents et actifs l'EFSA a publié des lignes directrices définissant la forme et la manière de soutenir l'industrie dans la constitution de dossiers de demande d'autorisation (EFSA-Q-2005-041) de nanomatériaux, qui s'avèrent obligatoires.

L'EFSA a également réalisé une évaluation des constituants actifs et des substances autorisées dans une liste communautaire (Industrie et Technologie, 2013). En 2010, une consultation publique avait été initiée par la Commission européenne (Towards a Strategic Nanotechnology Action Plan (SNAP) ayant pour objectif de recueillir les avis des experts sur les besoins en matière de nanotechnologie sur les cinq prochaines années (CE, 2010). En 2011, l'EFSA a publié « Guidance on the risk assessment of the application of nanoscience and nanotechnologies in the food and feed chain ». Ce document expose les risques potentiels des nanomatériaux dans la chaîne d'approvisionnement ainsi que les niveaux d'exposition potentiels et les interactions avec les tissus. Le document appelle également à l'évaluation des risques selon les niveaux d'exposition. Pour l'EFSA, l'absence de méthodes d'essai appropriées et validées contribue à une identification et à une caractérisation inexactes des nanomatériaux. L'EFSA encourage donc les divers intervenants à effectuer de la recherche et de l'évaluation supplémentaire en raison de ces incertitudes et de ces limites (FAO/OMS, 2013).

Concernant la directive existante, la législation européenne limite les quantités de nanomatériaux utilisés dans les contenants alimentaires ou dans les emballages et exige que les résultats de l'étude de la migration soient fournis (CE, 2007). Quant à l'EFSA, il exige une évaluation des migrations de substances à partir de matériaux en contact avec les aliments en vertu de l'article 10 de la réglementation de l'UE (1935/2004) (CE, 2004). L'évaluation devrait contenir une séquence de tests y compris la migration et la détermination du risque de la substance pour la santé humaine (Bumbudsanpharoke et Ko, 2015).

Une nouvelle législation combine les directives 2000/13/CE et 90/496/CEE en une seule législation (CE, 2013). Selon ce règlement, tous les ingrédients alimentaires avec une forme de nanomatériaux manufacturés doivent être indiqués dans la liste des

ingrédients. Les noms de ces ingrédients doivent être suivis par le mot « nano » entre parenthèses. Cependant, ce nouveau règlement ne couvre pas les nanomatériaux dans les emballages ou récipients (op. cit.).

En France, selon le ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie (2015) a déclaré que :

Depuis le 1er janvier 2013, l'ensemble des fabricants, distributeurs ou importateurs doivent déclarer les usages de substances à l'état nanoparticulaire ainsi que les quantités annuelles produites, importées et distribuées sur le territoire français. Et depuis, environ «3400 déclarations ont été réalisées au 30 juin 2013 date limite pour déclarer les substances fabriquées, distribuées ou importées en 2012» (Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie de la France, 2015, s.p.).

Cette initiative est une première en Europe. La déclaration est obligatoire lorsqu'au moins 100 grammes de substance à l'état nanoparticulaire ont été produits, distribués ou importés dans le pays (Anses, 2012). Cette déclaration permettra de mieux connaître les substances à l'état nanoparticulaire présentes sur le marché et leurs utilisations. Elle permet de surveiller les nanomatériaux dans les différents secteurs d'utilisation, d'avoir une meilleure connaissance du marché et des volumes commercialisés et une collecte d'informations relatives à leurs propriétés toxicologiques (Ministère de l'Écologie et du Développement durable, 2015).

V.6.2. Encadrement législatif et réglementaire en Amérique du Nord

En juin 2011, la FDA (Food and Drug Administration) a publié un rapport à l'égard des produits réglementés par l'organisme et qui contiennent des nanomatériaux (US FDA 2011; Adams 2012). Ce document, ne fixe pas de réglementations, mais est destiné à aider les fabricants ainsi que les parties prenantes, à considérer les

implications potentielles, les préoccupations en matière de sécurité et les impacts sur la santé publique qui pourraient résulter de l'utilisation des nanomatériaux (Bumbudsanpharoke et Ko, 2015).

En octobre 2011, la National Nanotechnology Initiative (NNI) une instance américaine de promotion des nanotechnologies, a publié son rapport de stratégie nationale pour assurer, selon le rapport de la FAO/OMS (2013), « le développement responsable des nanotechnologies et pour soutenir la prise de décisions réglementaires ». Le rapport met l'accent sur l'environnement, la santé et les problèmes de sécurité. Toutefois, ce rapport annonce que plus de recherches sont nécessaires pour déterminer les propriétés physico-chimiques des nanomatériaux ainsi que les méthodes de mesure et de surveillance pour les nanomatériaux dans les milieux d'exposition (Bumbudsanpharoke et Ko, 2015).

En juin 2014, la FDA a publié un document qui fournit des directives aux fabricants d'ingrédients alimentaires et de substances au contact des aliments (FSSC), aux utilisateurs finaux d'ingrédients alimentaires y compris les additifs de couleur. Dans son document, la FDA recommande aux fabricants d'étudier et de préparer un profil complet de toxicologie des nanomatériaux (Bumbudsanpharoke et Ko, 2015).

En mars 2014, l'EPA a pris des mesures pour interdire la vente d'emballages alimentaires en plastique contenant des nanoparticules d'argent produit par Pathway Investment Corp. puisque leurs produits n'avaient jamais été testés ou enregistrés auprès de l'EPA (op. cit.). L'EPA déclarait à ce propos que « la moisissure, les champignons ou les bactéries contrôlés ou détruits par un produit particulier doivent être soutenus par des tests de sorte que les consommateurs sachent que les produits font ce que les étiquettes disent » (Martin, 2014).

Selon le rapport de 2013 de la FAO et de l'OMS, le Canada n'avait pas alors de réglementation sur les nanomatériaux, ce qui était toujours le cas en 2016 selon Beaudoin:

Alors que le développement d'un règlement concernant l'étiquetage de nanomatériaux dans les denrées alimentaires est toujours en cours (CE, 2011, 2013) et qu'un moratoire sur l'utilisation des nanomatériaux dans les aliments a été proposé par les députés européens en novembre 2014 (Europaforum, 2014), le Canada reste muet sur ces questions (Beaudoin, 2016, p. 97).

Selon, toujours, Beaudoin (2016), la loi canadienne sur la protection de l'environnement, souligne que les «exigences de données actuelles pourraient ne pas être adéquates aux fins d'évaluation valable des risques que posent les nanomatériaux» (Environnement Canada et Santé Canada, 2007, p. 7, citées dans Beaudoin, 2016).

V.6.3. Encadrement législatif et réglementaire au Brésil

Le Brésil a été reconnu comme un chef de file dans la recherche en nanotechnologie en Amérique du Sud (Foladori et Invernizzi, 2013 ; Foladori et Lau, 2014). En août 2011, les experts du Forum sur la compétitivité brésilienne sur les nanotechnologies se sont réunis à Sao Paulo pour discuter de la réglementation effective des nanotechnologies pour le secteur industriel et pour élaborer des normes possibles, des lois et des lignes directrices pour la réglementation des nanotechnologies au Brésil (FAO/OMS, 2013).

En septembre 2013, une proposition visant à introduire une nouvelle étiquette pour tous les aliments, les médicaments et les produits cosmétiques contenant des matériaux nanostructurés a été rejetée par le Congrès brésilien sous prétexte que «la

nouvelle étiquette pourrait nuire aux entreprises ayant investi dans les nanotechnologies» (Bumbudsanpharoke et Ko, 2015). Cependant, certains experts ont fait valoir que la réglementation rendrait la nanotechnologie et ses applications industrielles plus transparentes et pourrait ainsi constituer une bonne base pour faire avancer la recherche et obtenir le soutien du public (op. cit.). Dans cette optique, une nouvelle proposition a été élaborée et implique l'étiquetage de tous les produits contenant des nanotechnologies sans nécessiter le changement d'autres lois. Il faut souligner l'absence, encore en 2013 de rapports de mise à jour et de progrès (Almeida, 2013) bien que les experts espéraient l'approbation rapide de cette nouvelle proposition de loi.

V.7 Conclusion du Chapitre V

Une législation et des lignes directrices devraient être élaborées et promulguées pour protéger la santé publique de la propagation des nanomatériaux dans les applications alimentaires et, par conséquent, cette question devrait être abordée dans le cadre de la politique de planification internationale.

CONCLUSION

La nanotechnologie est un domaine en progression rapide, dont les effets pourront avoir un impact énorme sur des domaines tels que les matériaux, l'électronique, la médecine et l'agroalimentaire. Bien qu'elle soit une technologie émergente, sa part sur le marché s'accroît de façon significative. Ses applications dans l'industrie de l'alimentation et des emballages alimentaires sont de plus en plus largement disponibles sur le marché. Selon Bumbudsanpharoke et Ko, (2015), plus de 400 entreprises dans le monde développeraient déjà cette technologie pour ses applications potentielles dans les aliments et les emballages alimentaires.

Les applications de la nanotechnologie peuvent jouer un rôle majeur dans l'industrie alimentaire, mais suscitent de multiples interrogations relatives à la protection de la santé humaine et de l'état de l'environnement. Plusieurs études, dont celles de Hannon et al., 2016; Echegoyen et Nerín, 2013; Cushen *et al.*, 2012, démontrent que les nanoparticules utilisées dans les emballages alimentaires du fait de leurs propriétés physico-chimiques (taille, le ratio surface/volume élevé des NPs, la complexité chimique, propriétés magnétiques, de réactivité chimique, de résistance mécanique et de conductivité thermique) (Jang *et al.*, 2001; Wang et Ro, 2006) peuvent migrer d'un compartiment à l'autre et altérer ainsi la qualité des aliments.

D'autres études (Avella *et al.*, 2005; Bott *et al.*, 2014) minimisent la migration des nanomatériaux contenus dans les aliments et les emballages alimentaires.

Ajoutons que l'ingestion de ces aliments chez l'humain peut occasionner divers troubles de santé (Irsst, 2006). En outre, considérant l'ensemble du cycle de vie et du processus de production jusqu'aux déchets, les nanomatériaux représentent un danger pour les écosystèmes (op. cit.).

Louise Vandelac souligne que le développement des nano-emballages dans le secteur nanoalimentaire constitue notamment un outil de concentration économique et de compétition qui ne doit donc pas être développé au détriment de la santé publique et de l'environnement (Vandelac, 2015 ; Beaudoin, Vandelac et Papilloud, 2013). Les consommateurs veulent être renseignés sur les risques et les avantages des applications de la nanotechnologie dans le secteur agroalimentaire afin de faire des choix conséquents. Ces diverses interrogations soulignent le besoin urgent de recherches complémentaires et d'encadrement concernant la nanotechnologie. Or, la dernière législation de l'Union européenne sur la sécurité des nanomatériaux publiés en 2014 ne couvre pas les nano-emballages alimentaires, au moment où certains emballages actifs et intelligents sont déjà sur le marché. Ainsi, Beaudoin (2016) s'interroge :

Est-ce normal qu'on teste sur les citoyens des produits qu'on met sur le marché avant de les avoir analysés ? Nous croyons qu'il y a là un problème d'irresponsabilité gouvernemental criant et cela justifie qu'une intervention urgente des pouvoirs publics soit effectuée en regard des modalités d'encadrement et d'évaluation (Beaudoin, 2016, p. 105).

Il est du devoir de chaque gouvernement national de se pencher sur cette question afin d'élaborer et d'adopter des législations et des lignes directrices pour protéger la santé publique contre la propagation des nanomatériaux dans les applications liées à l'alimentation. Plus encore, cette question devrait être abordée dans le cadre d'instances internationales.

L'évolution de la nanotechnologie dans les emballages alimentaires semble conditionnée par l'étroite collaboration entre toutes les parties prenantes de la chaîne pour intégrer les préoccupations et la gestion des risques.

Le manque d'informations sur l'évaluation des risques limite la bonne réglementation et le développement de ces produits de haute technologie dans le secteur de l'alimentation. Par conséquent, souligne Souza *et al.*, (2016), d'autres recherches dans ce domaine sont nécessaires. Il n'existe généralement pas de techniques pour la détection et la caractérisation des nanomatériaux dans des applications pratiques. Pour évaluer de manière critique le risque de nanomatériaux utilisés dans les emballages alimentaires, c'est-à-dire d'étudier le potentiel de migration des nanoparticules à travers l'emballage, la combinaison de techniques analytiques appropriées sont cruciales pour les mesures quantitatives des nanomatériaux (*ibid.*).

Si les applications relatives à la nanotechnologie dans le domaine des emballages peuvent jouer un rôle majeur dans l'industrie agroalimentaire, l'acceptation ou le refus de cette technologie est en partie tributaire de l'accès du public à l'information et à la transparence des pouvoirs publics dans ce domaine. Ainsi, la mise en œuvre de registres nationaux permettant de suivre l'évolution de la production et de l'importation des nanoproducts, comme l'a amorcé la France, l'encouragement par les pouvoirs publics des recherches sur les impacts santé et environnement et la publication des analyses sur les nano-emballages pourraient mieux éclairer le débat public et la décision politique.

Pour l'instant toutefois, force est de reconnaître qu'en l'absence de dispositifs rigoureux d'évaluation de ces produits et compte tenu des insuffisances des cadres législatifs et réglementaires permettant un solide encadrement, l'industrie des nano-emballages semble profiter davantage aux firmes productrices et à toute la chaîne de mise en marché qu'au bien-être de la population et à la préservation des écosystèmes.

Pour répondre aux défis auxquels notre planète et nos sociétés sont confrontées, il importe donc de mettre en œuvre des dispositifs d'évaluation scientifiques beaucoup

plus transparents et rigoureux ainsi que des politiques publiques tenant compte bien davantage de l'environnement et des besoins sociaux des populations.

BIBLIOGRAPHIE

- Adam, M. (2013). *Les nano-emballages, des risques environnementaux encore mal définis*. Récupéré de:
<http://www.marketing-pgc.com/2013/03/21/dossier-les-nano-emballages-des-risques-environnementaux-encore-mal-definis/>
- Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail (Afsset). (2006) Les nanomatériaux – effets sur la santé de l'homme et sur l'environnement. Saisine Afsset: 2006(Report n 2005/010).
- Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail (Afsse). (2009). *évaluation des risques liés aux nanomatériaux pour la population générale et pour l'environnement*. Récupéré de:
<http://www.afsset.fr/index.php?pageid=2611&parentid=424> [cité 23 mars 2013]
- Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses). (2014). *Ecogénotoxicologie des nanomatériaux*. Récupéré de:
<https://www.anses.fr/fr/lexique/nanoparticules>.
- Agence Science-Press. (2008). Nanotechnologies, peu de certitudes, beaucoup d'inquiétudes. Récupéré de:
<http://antahkarana.forumzen.com/t607p60-frequences-destructurantes-douleurs-et-ascensionquot>.
- Aitken, R., Chaudhry, M. Q., Boxall, A. B. A., & Hull, M. (2006). Manufacture and use of nanomaterials: current status in the UK and global trends. *Occupational medicine*, 56(5), 300-306.
- Aliments Industrie ET commerce Ontario (AICO). (2005). *Votre guide de Transformation des Aliments en Ontario, emballage ET étiquetage*. Récupéré de:
http://valorisationcapitalhumain.ca/index.cfm?Voir=sections&Id=7310&M=2394&Repertoire_No=2137987698#1

- Almeida, C. (2013). *Brazil struggles to regulate emerging nanotechnology*. *Science and technology for development news and analysis website*. Récupéré de: ϕ
- Amis de la Terre U.S. (2011). *Nano-silver: policy failure puts public health at risk*. Récupéré de:
http://www.amisdelaterre.org/IMG/pdf/nano_rapport_foe_e-u_2014_.pdf
- Amrouche. (2012). *L'emballage*. Récupéré de:
<http://geniealimentaire.com/spip.php?article114> vis n°64 adopté.
- Angélique, S.-D. (2008). *Effets Biologiques De Nanoparticules Manufacture: Influence De Leurs Caractéristiques*. (Thèse de doctorat). L'Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement à Paris. Récupéré de:
http://www.IRSST.qc.ca/files/documents/fr/prev/v22_04/22-24.pdf.
- Anderson, A., & Anderson, A. (2009). *Nanotechnology, risk and communication*. Houndmills, Palsgrave Macmillan.
- Armand, L. (2011). *Effet des nanoparticules de dioxyde de titane sur les métalloprotéases, influence des paramètres physicochimiques*. (Thèse de doctorat). L'Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement à Paris. Récupéré de:
http://www.tel.archives-ouvertes.fr/docs/00/77/19/.../ThA_se_-_Lucie_-_Armand.pdf.
- Arora, A. Padua, G. -W. (2010). Review: Nanocomposites in Food Packaging. *Journal of Food Science*. 75(1): 43-49.
- Auplat, C. A., & Delemarle, A. (2015). Mieux comprendre les nouvelles opportunités liées aux nanotechnologies (Understanding New Business Opportunities Linked with Nanotechnologies).
- Aurélie, M. (2011). *Les Nanotechnologies Au Service De La Sante*. (Thèse de doctorat). Université Claude Bernard Lyon I. Récupéré de:
<http://www.idf.inserm.fr/.../CP+nanotechnologie+22+septembre+2011.pdf>
- Avella, M., De Vlieger, J. J., Errico, M. E., Fischer, S., Vacca:, & Volpe, M. G. (2005). Biodegradable starch/clay nanocomposite films for food packaging applications. *Food chemistry*, 93(3), 467-474.

- Azlin-Hasim, S., Cruz-Romero, M. C., Cummins, E., Kerry, J. P., & Morris, M. A. (2016). The potential use of a layer-by-layer strategy to develop LDPE antimicrobial films coated with silver nanoparticles for packaging applications. *Journal of Colloid and Interface Science*, 461, 239-248. doi: 10.1016/j.jcis.2015.09.021
- Bach, C. (2011). *Évaluation de la migration des constituants de l'emballage en poly (PET) vers l'eau, des facteurs d'influence et du potentiel toxique des migrants*. (Thèse de doctorat). Institut National Polytechnique de Lorraine - INPL. Récupéré de: https://tel.archives-ouvertes.fr/file/index/docid/.../ThA_se_C.Bach.PET.pdf
- Bergeron, A.- G. (2014). *Nanotechnologies, Alimentation et Cosmétiques: le cas du Dioxyde de Titane et du Dioxyde de Titane nanométrique et la part du Québec dans cette*. (Mémoire de Maitrise). Université du Québec à Montréal. Récupéré de: <http://www.archipel.uqam.ca/7537/1/M13701.pdf>
- Patenaude, J., & Béland, J. P. (2009). *Nanotechnologies: développement, enjeux sociaux et défis éthiques*. Presses de l'Université Laval.
- Bhatt, I. Tripathi, B. N. (2011). Interaction of engineered nanoparticles with various components of the environment and possible strategies for their risk assessment. *Chemosphere*. 82, 308-317.
- Balthazard, B.-L. (2006). *Le Développement durable face à la puissance publique*. Paris: L'Harmattan.
- Beauchesne, Zins et associés (ZBA). (2008). *Emballage alimentaire: Enjeux et opportunités*. Récupéré de : http://www.agrireseau.qc.ca/...Alimentaire/.../CTAC_emballage_alimentaire.pdf
- Beaudoin, S. (2008). *La Transgénèse animale est- elle compatible avec une agriculture durable ? le cas du porc transgénique hypophorique*. (Mémoire de maitrise). Université du Québec à Montréal. Récupéré de: <http://www.archipel.uqam.ca/1808/1/M10606.pdf>
- Beaudoin, Simon. Dispositifs d'évaluation des risques des nanotechnologies au Canada. Doctorat en Sciences de l'environnement, UQAM, codirection C. Emond, 2008-2013

- Beaudoin, S. Vandelac, L. Papilloud, C. (2013). Nanofoods: Environmental, Health and Socioeconomic Risks or the Achilles' Heel of Nanotechnologies?. in *Nanotechnology and Human Health*, Ineke Malsch et Claude Emond (eds), CRC Press, Taylor and Francis Group, England.
- Beaudoin, S. (2016). *Dispositifs réglementaires et évaluatifs des Nanomatériaux au Canada: Examen de l'Évaluation du Risque*. (Thèse de Doctorat). Université du Québec à Montréal.
- Beck, U. (2008). *La société du risque, sur la voie d'une autre modernité*. Paris: Flammarion, 521p.
- Benslimane, N. (2014). *Contribution à l'élaboration d'un plan de contrôle des emballages plastiques en contact avec les denrées alimentaires*. (Mémoire de maîtrise). Université Abou Bekr Belkaid-Tlemcen, Algérie.
- Berge, M. (2013). *Le Développement Du Nano-Argent ; Entre Représentations Hygiénistes, Déterminisme Technoscientifique Et Marché: Analyse Sociologique*. (Mémoire de maîtrise). Université Du Québec à Montréal.
- Bertrand, M.-A. Bibeau, G. Crevier, V. David, H. Doucet, H. Gélinau, L... Niculescu, B. (2002). L'interdisciplinarité et la recherche sociale appliquée Réflexions sur des expériences en cours. Récupéré de: <http://www.etudessup.fas.umontreal.ca/sha/documents/interdisciplinarite.pdf>
- Béland, J.-P. Patenaude, J. (2009). *Les nanotechnologies: Développement, Enjeux Sociaux et défis Éthiques*. Les presses de l'Université de Laval.
- Bieberstein, A., Roosen, J., Marette, S., Blanchemanche, S., & Vandermoere, F. (2013). Consumer choices for nano-food and nano-packaging in France and Germany. *European review of agricultural economics*, 40(1), 73-94.
- Blasco C, Pico Y. (2011). Determining nanomaterials in food. *Trend Anal Chem* 30(1): 84-99.
- Bolis, A. (2013). *Nanoparticules: L'ingrédient qui s'est discrètement invité à notre table*. Récupéré de: http://www.lemonde.fr/planete/article/2012/12/31/nanoparticules-l-ingredient-qui-s-est-discretement-invite-a-notre-table_1810783_3244.html#K9pLveqTy5vGJbMZ.99

- Bondarenko, O. Juganson, K. Ivask, A. Kasemets, K. Mortimer, M. Kahru, A. (2013). Toxicity of Ag, CuO and ZnO nanoparticles to selected environmentally relevant test organisms and mammalian cells in vitro: a critical review. *Archives of Toxicology*. 87(7): 1181-200.
- Bottero, J. Y., Rose, J., & Wiesner, M. R. (2006). Nanotechnologies: tools for sustainability in a new wave of water treatment processes. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 2(4), 391-395.
- Bott, J., Störmer, A., & Franz, R. (2014). Migration of nanoparticles from plastic packaging materials containing carbon black into foodstuffs. *Food Additives & Contaminants: Part A*, 31(10), 1769-1782.
- Bumbudsanpharoke, N., & Ko, S. (2015). Nano□Food Packaging: An Overview of Market, Migration Research, and Safety Regulations. *Journal of food science*, 80(5). Browaeys, D.B. (2009). *Le meilleur des nanomondes*. Paris: Buchet et Chastel. 276p.
- Brugger, L. (2005). Les implications des nanotechnologies pour la sécurité. Récupéré De; <http://www.natopa.int/default.asp?CAT2=651&CAT1=16&CAT0=2&COM=677&MOD=0&SMD=0&SSMD=0&STA&ID=0&PAR=0&LNG=1>
- Cedervall, T. Hansson, L.-A. Lard, M. Frohm, B. Linse, S. (2012). Food Chain Transport of Nanoparticles Affects Behaviour and Fat Metabolism in Fish. *J Pharm Pharmacol* 4 : 821-826.
- Castellini, O.-M. Wlejkó, G.-K. Holladay, C.-E. Theim, T.-J. Zenner, G.-M. Crone, W.-C. (2007). Nanopart Res. Scopus. [Base de données]. 9. 183.
- Centre de recherche pour le développement international (CRDI). (2011-). *Le développement par l'innovation*. (Rapport annuel). Canada. Récupéré de: <http://www.idrc.ca/FR/AboutUs/Accountability/AnnualReports/Rapport%20annuel%202010-2011.pdf>
- Centre interuniversitaire de référence sur l'analyse (CIRAIG). (2005). *l'interprétation et la gestion du cycle de vie des produits, procédés et services*. Récupéré de: <http://www.polvmtl.calcirai.ca/>.
- Centre Interuniversitaire de Recherche en Analyse des Organisations. (2006). *Les nanotechnologies: benefices et risques potentiels*. Récupéré de: <http://www.cirano.qc.ca/pdf/publication/2006RB-02.pdf>

- Centre National de Recherche Scientifique (CNRS). (2005). *Les nanosciences*.
Récupéré de:
http://www.cnrs.fr/fr/organisme/docs/espacedoc/nano_fr_web.pdf
- Centre Nationale de la Recherche Scientifique (CNRS). (2006). *Enjeux éthiques de nanosciences et nanotechnologies*. Récupéré de:
<http://www.cnrs.fr/comets/IMG/pdf/10-ethique-nanos.pdf>
- Centre National de Recherche Scientifique (CNRS). (2008). *Etat de la recherche sur les effets des nanoparticules sur la santé et l'environnement*. Récupéré de:
<http://www.cea.fr/Effets%20nanoparticules%20sante%20environnement.pdf>
- Centréco. (2012). *La filière emballage-conditionnement en region centre*. Récupéré de:
<http://centreco.regioncentre.fr/sites/default/files/publications/etude-emballage-conditionnement-region-centre.pdf>
- Chaire Internationale sur le cycle de vie (CICV). (2012). *Approche cycle de vie*.
Récupéré de: http://www.chaire-cycledevie.org/fr/approche_cv.php
- Charron, D.-F. (dir). (2014). *La recherche écosanté en pratique: Applications novatrices d'une approche écosystémique de la santé* (version 3). Ottawa: Springer
- Chaudhry, Q. Boxall, A. Aitken, R. Hull, M. (2005). A scoping study into the manufacture and use of nanomaterials in the UK. York, Central Science Laboratory.
http://www.defra.gov.uk/science/Project_Data/DocumentLibrary/CB01070/CB01070_3156_FRP.doc Consulté le 17 septembre 2014.
- Chaudhry, Q. Scotter, M. Blackburn, J. Ross, B. Boxall. A, Castle, L... Watkins R. (2008). Applications and implications of nanotechnologies for the food sector. Food Additives & Contaminants, part A: Chemistry, Analysis, Control, Exposure & Risk Assessment, 25(3): 241–258.
- Cleuziou, J.-P. (2007). *Propriétés de transport électronique de nanotubes de carbone : des nanotubes hybrides au nano-SQUID*. (Thèse de Doctorat). Université de Toulouse. Récupéré de:
http://thesesups.ups-tlse.fr/156/1/Cleuziou_Jean-Pierre.pdf

- Cloutier, M.-E. (2012). *Emballages alimentaires: Comment s'y retrouver?* Récupéré de:
<http://matv.ca/montreal/matv-blogue/mes-articles/2012-12-06-emballages-alimentaires-comment-s-y-retrouver>
- Comité D'experts Sur Les Nanotechnologies. (2008-). *Petit et différent, perspective scientifique sur les défis réglementaires du monde nanométrique*. Rapport 2008. Canada: Le savoir au service du public.
- Commission De L'éthique En Science Et En Technologie (CEST). (2011). *enjeux éthiques des nanotechnologies dans le secteur agroalimentaire*. Récupéré de:
www.fne.asso.fr/transfert/nanotechnologies/page_nano_a20.pdf
- Commission mondiale sur l'environnement et le développement (CMED), *Rapport Brundtland. (-1988). Notre avenir à tous*. Montréal: Éditions du Fleuve/ Les Publications du Québec, 454 p.
- Conseil National de l'Alimentation (CNA). (2009). *Avis sur le développement des nouvelles technologies dans la fabrication, le conditionnement et la conservation des denrées alimentaires: conséquences, responsabilité des opérateurs et acceptabilité sociale*. Récupéré de:
http://agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/Avis_no65.pdf
- Conseil National de l'Emballage. (2010). *L'emballage et la santé, l'hygiène et la sécurité*. Récupéré de:
http://www.conseil-emballage.org/Img/Publications/71_1.pdf
- Conseil supérieur de la recherche et de la technologie (CSRT). (2009). *Nanotechnologies: sciences, marché, réglementation et société. Quelles avancées?* France : la documentation française.
- Coulibaly Zié, O. (2013). *Santé humaine, animale et l'environnement: L'écosanté au secours du développement*. Récupéré le 29 mars 2014 de:
http://www.civox.net/Sante-humaine-animale-et-l-environnement-L-ecosante-au-secours-du-developpement_a4205.html
- Comité scientifique des risques sanitaires émergents et nouveaux (CSRSSEN). (2007). *Opinion on the appropriateness of the risk assessment methodology in accordance with the technical guidance documents for new and existing substances for assessing the risks of nanomaterials*. Récupéré de:
http://ec.europa.eu/health/archive/ph_risk/committees/04_scenih/docs/scenih_r_o_010.pdf.

- Commission Européenne. (2007). *Commission Directive 2007/19/EC of 2 April 2007 amending Directive 2002/72/EC relating to plastic materials and articles intended to come into contact with food and Council Directive 85/572/EEC laying down the list of simulants to be used for testing migration of constituents of plastic materials and articles intended to come into contact with foodstuffs*. Récupéré de:
https://www.fsai.ie/uploadedFiles/Legislation/Legislation_Update/Cor_to_Dir_2007_19.pdf.
- Commission Européenne. (2010). *Towards A Strategic Nanotechnology Action Plan (SNAP) 2010-2015*. Récupéré de:
http://ec.europa.eu/research/consultations/snap/report_en.pdf.
- Commission Européenne. (2011). Règlement No. 10/2011 concernant les matériaux et objets en matière plastique destinés à entrer en contact avec des denrées alimentaires.
- Commission Européenne. (2013). *Food labelling - EU rules 2014*. European Commission Website. Récupéré de:
http://ec.europa.eu/food/food/labellingnutrition/foodlabelling/proposed_legislation_en.htm.
- Curall, S.- C. King, E.-B. Lane, N. Madera, J. Tumer, S. (2006). Nature Nanotechnol. Scopus. [Base de données]. 1. 153.
- Cushen, M., Kerry, J., Morris, M., Cruz-Romero, M., & Cummins, E. (2012). Nanotechnologies in the food industry—Recent developments, risks and regulation. *Trends in Food Science & Technology*, 24(1), 30-46.
- Dartiguepeyrou, C. Ribière, G. Ducret: Scolan, M. Carisé, J.-P. d’Humières: Pastore- Reiss, E. (2013). *Quelles valeurs pour le développement durable?* Récupéré de:
<http://vraiment-durable.environnement-magazine.fr/acces-non-abonne-vraiment-durable>.
- Del Castillo, A. M. P. (2010). La réglementation européenne en matière de nanotechnologies. *Courrier hebdomadaire du CRISP*, (20), 5-40.
- Dietiker, M. Knébel, S. Meili, C. (2011). *Module de notions fondamentales : Pourquoi «nano»? Récupéré de:*
http://www.swissnanocube.ch/uploads/tx_rfnanoteachbox/GrundlagenModul_FR_Teil4.pdf

- de Moura, M. R., Lorevice, M. V., Mattoso, L. H., & Zucolotto, V. (2011). Highly stable, edible cellulose films incorporating chitosan nanoparticles. *Journal of food science*, 76(2), N25-N29. doi: 10.1111/j.1750-3841.2010.02013.x.
- Deus, D., Kehrenberg, C., Schaudien, D., Klein, G., & Krischek, C. (2016). Effect of a nano-silver coating on the quality of fresh turkey meat during storage after modified atmosphere or vacuum packaging. *Poultry Science*, pew308. doi: 10.3382/ps/pew308.
- Duncan, T. V. (2011). Applications of nanotechnology in food packaging and food safety: barrier materials, antimicrobials and sensors. *Journal of colloid and interface science*, 363(1), 1-24.
- Dobrucka, R. (2014). Application of nanotechnology in food packaging. *The Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences*, 3(5), 353.
- Donaldson K, Stone V, Clouter A, Renwick L, MacNee W, 2001. Ultrafine particles. *Occup Environ Med* 58 (3): 211-6.
- Duncan, T. V., & Pillai, K. (2014). Release of engineered nanomaterials from polymer nanocomposites: diffusion, dissolution, and desorption. *ACS applied materials & interfaces*, 7(1), 2-19.
- Duncan, T.-V. (2011). Applications of nanotechnology in food packaging and food safety: Barrier material, antimicrobials and sensors. *Journal of colloid and interface science*. 363. 1-24.
- Durand, L., & Tossa: (2016). Évaluation toxicologique des nanomatériaux d'oxydes métalliques : quelle place actuelle pour la modélisation «structure-activité»? *Environnement, Risques & Santé*, 15(6), 496-505.
- Echegoyen, Y., & Nerín, C. (2013). Nanoparticle release from nano-silver antimicrobial food containers. *Food and Chemical Toxicology*, 62, 16-22. doi: 10.1016/j.fct.2013.08.014.
- Environnement Canada. s.d.a *Nanomatériaux*. En ligne. <<https://ec.gc.ca/subsnouvelles-news/subs/default.asp?lang=Fr&n=D179F162-1>>. Consulté le 10-10-2014. Date de modification: 8-09-2014.

- Esmailzadeh, H., Sangpour, F., Shahraz, F., Hejazi, J., & Khaksar, R. (2016). Effect of nanocomposite packaging containing ZnO on growth of *Bacillus subtilis* and *Enterobacter aerogenes*. *Materials Science and Engineering: C*, 58, 1058-1063. doi: 10.1016/j.msec.2015.09.078.
- ETC Group. 2004. *La ferme atomisée: L'impact des nanotechnologies sur l'agriculture et l'alimentation*. Ottawa: ETC Group, 68 p.
- Faria, M., Navas, J. M., Soares, A. M., & Barata, C. (2014). Oxidative stress effects of titanium dioxide nanoparticle aggregates in zebrafish embryos. *Science of the Total Environment*, 470, 379-389.
- Federici, G. Shaw, B. Handy, R. (2007). Toxicity of titanium dioxide nanoparticles to rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*): Gill injury, oxidative stress, and other physiological effects. *Aquatic Toxicol.* 84(4): 415-430.
- Fischer, A. R., van Dijk, H., de Jonge, J., Rowe, G., & Frewer, L. J. (2013). Attitudes and attitudinal ambivalence change towards nanotechnology applied to food production. *Public Understanding of Science*, 22(7), 817-831.
- Foladori, G. Invernizzi, N. (2013). Inequality gaps in nanotechnology development in Latin America. *J Arts Hum* 2(3): 35-45.
- Food and Drug Administration (FDA). (2007). Nanotechnology: A report of the US food and drug administration nanotechnology task force. FDA, Washington, D.C. <http://www.fda.gov/downloads/ScienceResearch/SpecialTopics/Nanotechnology/ucm110856.pdf>/ Accessed 15.04.10.
- Foladori, G. Lau, E.-Z. (2014). The regulation of nanotechnologies in Mexico. *Nanotech L Bus* 11: 164.
- Frampton, MW. Stewart, JC. Oberdorster, G. Morrow, PE. Chalupa, D. Pietropaoli, AP. (2006). Inhalation of ultrafine particles alters blood leukocyte expression of adhesion molecules in humans. *Environ Health Perspect*; 114(1): 51-8.
- Front Commun Québécois pour une Gestion Écologique des Déchets (FCQGED). (2016). L'abolition des sacs de plastique à usage unique au Québec. Récupérer le 25 mai 2017, de: http://www.fcqged.org/pdf/Presentation_sur_sacs_AREQ_mars_2016.pdf
- Garnett, M.-C. Kallinteri: (2006). Nanomedicines and nanotoxicology: some physiological principles. *Occup Med Oxford* 56 (5): 307-11.

- Gatti, A. M. (2004). Biocompatibility of micro-and nano-particles in the colon. Part II. *Biomaterials*, 25(3), 385-392.
- Gâteau, C. (2013). *L'obligation d'information due au consommateur, l'exemple du secteur agro-alimentaire*. Récupéré de: http://www.hoganlovells.com/.../PARLIB01-%231267586v1Journal_des_Sociétés.pdf
- Genaidy, A. Tolaymat, T. Sequeira, R. Rinder, M. Dionysiou, D. (2009). Health effects of exposure to carbon nanofibers: systematic review, critical appraisal, meta analysis and research to practice perspectives. *Science of the Total Environment*, 407, 3686-3701.
- Geiser, M. Rothen-Rutishauser, B. Kapp, N. Schurch, S. Kreyling, W. Schulz, H. Semmler, M. Im Hof, V. Heyder, J. Gehr P. (2005). Ultrafine particles cross-cellular membranes by nonphagocytic mechanisms in lungs and in cultured cells. *Environ Health Perspect* 113(11): 1555–60.
- Genest, J. Beauvais, J (2009). Nanosciences et nanotechnologies, dans Béland Jean-Pierre, Patenaude Johane, 2009, Les nanotechnologies, développement, enjeux sociaux et défis éthiques, Québec, Les Presses de l'Université Laval.
- Geremew, T. T. (2012). Physicochemical fate of metallic nanoparticles in aquatic environments (Doctoral dissertation, GHENT UNIVERSITY).
- Geys, J. (2012). *Les nanoparticules dans l'alimentation*. Récupéré de: http://www.afsca.be/laboratoires/Labinfo/_.../2012-07_labinfo8fr_p04_fr.pdf
- Gouvernement Canada. (2017). *Profil industriel de l'industrie canadienne des produits en matière de plastique*. Récupéré le 20 Mai 2017 de: <https://www.ic.gc.ca/eic/site/plastics-plastiques.nsf/fra/pl01383.html>
- Greco, F., Courbiere, B., Rose, J., Orsiere, T., Sari-Minodier, I., Bottero, J. Y., ... & Perrin, J. (2015). Reprotoxicite des nanoparticules. *Gynécologie Obstétrique & Fertilité*, 43(1), 49-55.
- Gruère, G.-P. (2012). Implications of nanotechnology growth in food and agriculture in OECD countries. *Food Policy*, 37(2): 191–198.

- Guillaud, H. (2009). *Nanotechnologies: le point de vue environnemental*. Récupéré le 22 septembre 2014 de:
<http://www.internetactu.net/2009/10/08/nanotechnologies-le-point-de-vue-environnemental/>
- Gustavo, M. (2011). *Méthode d'analyse du cycle de vie des emballages*. (Thèse de Maitrise). Département de génie mécanique faculté de sciences et de génie université Laval Québec. Récupéré le 15 décembre 2015 de:
<http://www.theses.ulaval.ca/2011/28009/28009.pdf>.
- Hannon, J. C., Kerry, J. P., Cruz-Romero, M., Azlin-Hasim, S., Morris, M., & Cummins, E. (2016). Human exposure assessment of silver and copper migrating from an antimicrobial nanocoated packaging material into an acidic food simulant. *Food and Chemical Toxicology*, 95, 128-136. doi: 10.1016/j.fct.2016.07.004.
- Hassan, R. Scholes, R. Ash, N. (dir.) (2005-). Rapport de synthèse de l'Évaluation des écosystèmes pour le millénaire, abrégé de Ecosystems and Human Well-Being : Current State and Trends , vol. 1, série Millennium Ecosystem Assessment, Island Press, Washington, DC, É.-U. récupéré de:
<http://www.millenniumassessment.org/documents/document.447.aspx.pdf>.
- Heilbrunn, B. Barré, B. (2012). *Le packaging*. Paris: Presses Universitaires de France «Que sais-je?». 128 p.
- Hoet:-H. Brûske-Hohlfeld, I. Salata, O.-V. (2004). Nanoparticles known and unknown health risks. *J Nanobiotechnol* 2(1):12.
- Hsiao I.-L., Huang Y.-J., (2011). Effects of various physicochemical characteristics on the toxicities of ZnO and TiO₂ nanoparticles toward human lung epithelial cells. *Sci Total Environ*. 409, 1219-28.
- Hund-Rinke K, Simon M. (2006). Ecotoxic effect of photocatalytic active nanoparticles (TiO₂) on algae and daphnids. *Environ Sci Poll Res* 13(4): 225-232
- Huang, J. P., Hsieh: C., Chen, C. Y., Wang, T. Y., Chen: C., Liu, C. C., ... & Chen, C. P. (2015). Nanoparticles can cross mouse placenta and induce trophoblast apoptosis. *Placenta*, 36(12), 1433-1441.
- Huang, J. Y., Li, X., & Zhou, W. (2015). Safety assessment of nanocomposite for

food packaging application. *Trends in Food Science & Technology*, 45(2), 187-199.

Iavicoli, I., Leso, V. Fontana, L. Bergamaschi, A. (2011). Toxicological effects of titanium dioxide nanoparticles : a review of in vitro mammalian studies. *Eur rev Med Pharmacol Sci* 15, 481-508.

Industrie et Technologie. (2013). *Emballages: la tendance est à la fonctionnalisation*. Récupéré le 18 novembre 2015 de:
<http://www.industrie-techno.com/emballages-la-tendance-est-a-la-fonctionnalisation.22852>

Imran, M., Revol-Junelles, A. M., Martyn, A., Tehrany, E. A., Jacquot, M., Linder, M., & Desobry, S. (2010). Active food packaging evolution: transformation from micro-to nanotechnology. *Critical reviews in food science and nutrition*, 50(9), 799-821. doi: 10.1080/10408398.2010.503694.

Institut fédéral pour l'évaluation des risques (IFR). (2010). Des nanoparticules d'argent dans les produits alimentaires et la nécessité journalière. Récupéré le 23 septembre 2015 de:
http://www.bfr.bund.de/cm/343/bfr_raet_von_nanosilber_in_lebensmitteln_und_produkten_des_taeegliche_bedarfs_ab.pdf.

Institut national de l'environnement industriel et des risques (INERIS). (2007). Nanotechnologies, Nano matériaux, Nano particules. Quels impacts sur l'homme et l'environnement? Récupéré de:
[http:// www.ineris.fr/centredoc/Depliant_BD_Nanotechnologies.pdf](http://www.ineris.fr/centredoc/Depliant_BD_Nanotechnologies.pdf)

Institut national de la recherche agronomique (INRA). (2013). Nano-aliments ou nano-emballages: les consommateurs méfiants. Récupéré de:
<http://www.inra.fr/Grand-public/Alimentation-et-sante/Toutes-les-actualites/Nano-aliments-ou-nano-emballages-les-consommateurs-mefiants>

Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail IRSST). (2014). Portrait de la nanotechnologie au Québec dans les milieux industriels et de la recherche universitaire et publique (R-854). Montréal. Récupéré le 25 juin 2015 de:
<http://www.IRSST.qc.ca/media/documents/PubIRSST/R-854.pdf>

Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail IRSST). (2006). Les effets à la santé reliés aux nanoparticules (R-451). Montréal. Récupéré le 03 juin 2015 de:
<http://www.IRSST.qc.ca/files/documents/pubIRSST/r-451.pdf>

- International Risk Governance Council (IRGC). (2009). Appropriate risk governance strategies for Nanotechnology/ Application in food and cosmetic, Geneva, Switzerland. Récupéré le 30 juillet 2015 de:
[http:// : www.irgc.org/.../irgc_nanotechnologies_food_and_cosmetic. pdf](http://www.irgc.org/.../irgc_nanotechnologies_food_and_cosmetic.pdf).
- Jadot, Y., & Kiil-Nielsen, N. (2014). *Les écologistes appellent d'urgence à réglementer les nanotechnologies au niveau européen*. Récupéré de:
<http://ouest.europe-ecologie.eu/les-ecologistes-appellent-durgence-a-reglementer-les-nanotechnologies-au-niveau-europeen/>
- Jani: Halbert, G.-W. Langridge, J. Florence, A.-T. (1990). Nanoparticle uptake by rat gastrointestinal mucosa : quantification and particle size dependancy. *J Pharm Pharmacol* 42: 821-826.
- Jang, H. D., Kim, S. K., & Kim, S. J. (2001). Effect of particle size and phase composition of titanium dioxide nanoparticles on the photocatalytic properties. *Journal of Nanoparticle Research*, 3(2), 141-147.
- Johnston, H.-J., Hutchinson, G.-R. Christensen, F.-M. Peters, S. Hankin, S. Aschberger, K. Stone, V. (2010). A critical review of the biological mechanisms underlying the in vivo and in vitro toxicity of carbon nanotubes: The contribution of physic-chemical characteristics. *Nanotoxicology*, 4(2), 207-246.
- Ju-Nam, Y. Lead, J.-R. (2008). Manufactured nanoparticles: An overview of their chemistry, interactions and potential environmental implications. *Sci. Total Environ.* 400, 396-414.
- Kah, M., Beulke, S., Tiede, K., & Hofmann, T. (2013). Nanopesticides: state of knowledge, environmental fate, and exposure modeling. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 43(16), 1823-1867.
- Keller A.-A., Wang H., Zhou D., Lenihan H.-S., Cherr G., Cardinale, B.-J., Miller, R. Ji, Z. (2010). Stability and aggregation of metal oxide nanoparticles in natural aqueous matrices. *Environ. Sci. Technol.* 44, 1962-1967.
- Kleinschmit von Lengefeld, A. (2016). Aperçu des nouveaux marchés et produits du bois. *Ateliers REGEFOR 2015. Les innovations dans les usages du bois interpellent la gestion forestière*.
- Kuestner, S. (2016). *Comment réussir la tarification incitative au Québec: un outil pour les municipalités* (Doctoral dissertation, Université de Sherbrooke).

- Kuswandi, B. (2017). Environmental friendly food nano-packaging. *Environmental Chemistry Letters*, 1-17.
- Lacour, S. (2016). L'étiquetage des produits contenant des nanomatériaux: un cadrage juridico-politique de la controverse liée au développement des nanotechnologies. *Droit et société*, (3), 625-644.
- Lafontaine, C. (2010). Nanotechnologie et Société, Enjeux et perspectives: entretiens avec des chercheurs. Boréal (Montréal). 160p
- Lapointe, R. (2012). *Bioplastiques biodegradables, composables et biosourcés pour les emballages alimentaires, distinctions subtiles, mais significatives*. (Mémoire de maîtrise). Université de Sherbrooke. Québec, Canada. Récupéré le 26 juin 2015 de:
https://www.usherbrooke.ca/environnement/fileadmin/sites/environnement/documents/Essais2012/Lapointe_R__06-09-2012_.pdf
- Lautre, Y. (2017). Agir contre les nanoparticules dans les aliments: pétition pour exiger un moratoire.
- Lebel, J. (2010). La santé une approche écosystémique. Centre de recherches pour le développement international BP 8500, Ottawa (Ontario), Canada.
- Lee, J. A., Kim, M. K., Song, J. H., Jo, M. R., Yu, J., Kim, K. M., ... & Choi, S. J. (2017). Biokinetics of food additive silica nanoparticles and their interactions with food components. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 150, 384-392. doi: 10.1016/j.colsurfb.2016.11.001.
- Lee, C. J., Scheufele, D. A., & Lewenstein, B. V. (2005). Public attitudes toward emerging technologies examining the interactive effects of cognitions and affect on public attitudes toward nanotechnology. *Science communication*, 27(2), 240-267.
- Lesca, N. (2010). *Veille et Développement durable*. Paris: Lavoisier.
- Li, L., Zhao, C., Zhang, Y., Yao, J., Yang, W., Hu, Q., ... & Cao, C. (2017). Effect of stable antimicrobial nano-silver packaging on inhibiting mildew and in storage of rice. *Food chemistry*, 215, 477-482.
- Liu, Y., Li, H., & Xiao, K. (2016). Distribution and biological effects of nanoparticles in the reproductive system. *Current drug metabolism*, 17(5), 478-496.

- Lopez-Serrano A, Olivas, R.-M. Landaluze, J.-S. Camara C. (2014). Nanoparticles: À global vision. Characterization, separation, and quantification methods. Potential environmental and health impact. *Anal. Methods*. 6, 38-56.
- Lovern, B. Klaper R. (2006). *Daphnia magna* mortality when exposed to titanium dioxide and fullerene (c60) nanoparticles. *Environ Toxicol Chem* 25(4): 1132-1137
- Luo, Z., Wang, Y., Wang, H., & Feng, S. (2014). Impact of nano-CaCO₃/LDPE packaging on quality of fresh-cut sugarcane. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 94(15), 3273-3280.. doi: 10.1002/jsfa.6680.
- Maisanaba, S., Prieto, A. I., Pichardo, S., Jordá-Beneyto, M., Aucejo, S., & Jos, A. (2015). Cytotoxicity and mutagenicity assessment of organomodified clays potentially used in food packaging. *Toxicology in Vitro*, 29(6), 1222-1230.
- Macoubrie, J. (2005). Informed Public Perceptions of Nanotechnology and Trust in Government. Récupéré le 13 mai 2015 de:
[http://: www.wilsoncenter.org/sites/.../macoubriereport1.pdf](http://www.wilsoncenter.org/sites/.../macoubriereport1.pdf)
- Maniet, F. (2010). *L'encadrement Juridique Des Nanotechnologies Au Canada Et Dans L'union Européenne*. (Mémoire de maîtrise). Université Du Québec à Montréal.
- Market Attitude Research Services (MARS), (2009). Australian Community Attitude about Nanotechnology. Département de l'industrie, innovation, sciences et recherches. Australia. Récupéré de:
[http// : www.industry.gov.au/.../nanotechnology/.../Nanotechnology. pdf](http://www.industry.gov.au/.../nanotechnology/.../Nanotechnology.pdf).
- Martin, J. (2014). EPA takes action to protect public from an illegal nano silver pesticide in food containers; cites NJ company for selling food containers with an unregistered pesticide warns large retailers not to sell these products. Récupéré de:
<http://yosemite.epa.gov/opa/admpress.nsf/596e17d7cac720848525781f0043629e/6469952cdbc19a4585257cac0053e637!OpenDocument>.
- Martinez-Abad, A., Lagaron, J. M., & Ocio, M. J. (2012). Development and characterization of silver-based antimicrobial ethylene-vinyl alcohol copolymer (EVOH) films for food-packaging applications. *Journal of agricultural and food chemistry*, 60(21), 5350-5359. doi: 10.1021/jf300334z

- Mellouet, A.-G. Perrin, A. Saillard: Coulon: Druet, M. (2009). Industries agroalimentaires Fabricants d'emballages : Maîtriser ensemble l'emballage alimentaire. Récupéré de:
<http://www.innovation.rhonealpes.cci.fr/.../com.univ.collaboratif.utils.Lecture.pdf>
- Mercier-Bonin, M., Despax, B., Raynaud:, Houdeau, E., & Thomas, M. (2016). Exposition orale et devenir dans l'intestin des nanoparticules alimentaires: exemple de l'argent et du dioxyde de titane. *Cahiers de Nutrition et de Diététique*, 51(4), 195-203.
- Miller, G. Kinnear, S. (2008). *La nanotechnologie, la nouvelle menace alimentaire*. Récupéré le 01 octobre 2014 de :
<http://sos-crise.over-blog.com/article-la-nanotechnologie-la-nouvelle-menace-alimentaire-107580528.html>
- Ministère de l'Écologie et du Développement Durable. (2006). Quels dangers, Quels risques? Récupéré de:
<http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/16-3.pdf>
- Ministère de l'Économie, de l'Industrie et de l'Emploi (MÉIE). (2008). L'industrie Française de l'emballage en chiffre. Récupéré de:
http://www.insee.fr/sessi/publications/dossiers_sect/pdf/emballage08.pdf
- Ministère de l'Économie et des Finances (MEF). (2012). État des lieux de la réglementation encadrant l'information du consommateur. Récupéré le 16 aout 2015 de:
http://www.economie.gouv.fr/files/directions_services/cnc/avis/2013/etat_lieu_x_dematerialisation310113.pdf
- Ministère de l'Économie, de l'Industrie et du Numérique. (2015). Fiche générale relative à la réglementation des matériaux au contact des denrées alimentaires. Récupéré de:
<http://www.economie.gouv.fr/dgccrf/Fiche-generale-relative-a-la-reglementation-des-ma>
- Moati-Loire, S. Maincent, E. Crevoisier, L. Courjault, J-C. Pouquet, L. (2000). Les Grandes Tendances Prospectives de la Consommation. Récupéré de:
http://www.credoc.fr/pdf/Sou/prospective_consommation.pdf
- Mohanty, A.-K. Misra, M. Nalwa, H.-S. (2009). Packaging nanotechnology. Los Angeles, Calif. : American Scientific Publishers.

- Monfort-Windels, F. Lecomte, J. (2008). Les applications des nanotechnologies. Récupéré de: <http://www.minatuse.eu/pdf/Nanotechnologies-version-francaise.pdf>
- Morris, M.-C. (2012). Cancer et nanotechnologie Innovation en diagnostic, vectorisation et thérapeutique. Récupéré de: <http://www.rayonnementducnrs.com/bulletin/b58/nanotechno.pdf>
- Mueller, N. C. Nowack, B. (2008). Exposure modeling of engineered nanoparticles in the environment. *Environ. Sci. Technol.* 42(12) 4447-4453.
- Multon, J.-L. Bureau, G. (1998). L'emballage de denrées alimentaires de grande consommation. Paris: Édition Lavoisier. 1128p. Récupéré de: <http://www.youscribe.com/catalogue/livres/savoirs/l-emballage-des-denrees-alimentaires-de-grande-consommation-2-2393374>.
- Neethirajan, S. Jayas. D. (2011). Nanotechnology for the food and bioprocessing industries. *Food and Bioprocess Technology*, 4(1): 39–47.
- Netpak. (2015). *Les Nanotechnologies dans les emballages alimentaires: menace ou révolution?* Récupéré le 10/03/2015 de: <http://netpak.com/blog/les-nanotechnologies-dans-les-emballages-alimentaires-menace-ou-revolution/>
- NIOSH. (2012). General safe practices for working with engineered nanomaterials in research laboratories. Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health, NIOSH, 42 p.
- Nowack, B., Ranville, J. F., Diamond, S., Gallego-Urrea, J. A., Metcalfe, C., Rose, J., ... & Klaine, S. J. (2012). Potential scenarios for nanomaterial release and subsequent alteration in the environment. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 31(1), 50-59.
- Obadia, A. (2008-). Les nanotechnologies. Rapport du conseil économique et social, France. Récupéré de: <http://www.ladocumentationfrancaise.fr/var/storage/rapports-publics/084000408/0000.pdf>

- Oberdorster, G. Maynard, A. Donaldson, K. Castranova, V. Fitzpatrick, J. Ausman, ... Warheit, D. (2005). Principles for characterizing the potential human health effects from exposure to nanomaterials: elements of a screening strategy. doi : 10.1186/1743-8977-2-8
- Oberdorster G, Oberdorster E, Oberdorster J. Nanotoxicology: an emerging discipline evolving from studies of ultrafine particles. *Environ Health Perspect* 2005; 113(7): 823–39.
- O'Brien, NJ. Cummins, E.-J. (2011). A risk assessment framework for assessing metallic nanomaterials of environmental concern: aquatic exposure and behavior. *Pubmed*. 31(5): 706-26.
- Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) et Organisation mondiale de la santé (OMS). (2011-). *Application des nanotechnologies dans les secteurs de l'alimentation et de l'agriculture: incidences possibles sur la sécurité alimentaire*. Rapport de la réunion Rome, Italie. Récupéré de : [http// : www.fao.org/docrep/015/i1434f/i1434f00.pdf](http://www.fao.org/docrep/015/i1434f/i1434f00.pdf)
- Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) et Organisation mondiale de la santé (OMS). (2013-). *State of the art on the initiatives and activities relevant to risk assessment and risk management of nanotechnologies in the food and agriculture sectors*: FAO/WHO technical paper report. Rome, Italy: FAO/WHO.
- Ostiguy, C. Roberge, B. Ménard, L. Endo, C. (2008). Guide de bonnes pratiques favorisant la gestion des risques reliés aux nanoparticules de synthèse. Récupéré de: [http// : www.IRSST.qc.ca/files/documents/pubIRSST/r-586.pdf](http://www.IRSST.qc.ca/files/documents/pubIRSST/r-586.pdf)
- Papilloud, C. (2010). *Gouverner l'infiniment petit: les nanotechnologies à Grenoble et Hambourg*. Paris: Harmattan. 164p.
- Park B, Donaldson K, Duffin R, Tran L, Kelly F, Mudway I, et al. Hazard and risk assessment of a nanoparticulate cerium oxide-based diesel fuel additive – A case study. *Inhal Toxicol* 2008; 20(6): 547–66.
- Parks, A. N., Portis, L. M., Schierz: A., Washburn, K. M., Perron, M. M., Burgess, R. M., ... & Ferguson: L. (2013). Bioaccumulation and toxicity of single-walled carbon nanotubes to benthic organisms at the base of the marine food chain. *Environmental toxicology and chemistry*, 32(6), 1270-1277.

- Peltier, M. R., Arita, Y., Gurzenda, E. M., Klimova, N., Koo, H. C., Murthy, A., & Hanna, N. (2013). Effect of carbon monoxide on bacteria-stimulated cytokine production by placental explants. *American Journal of Reproductive Immunology*, 69(2), 142-149.
- Perreault, F. (2012). *Toxicité des nanoparticules métalliques chez différents modèles biologiques* (Doctoral dissertation, Université du Québec à Montréal).
- Pekkanen, J. Peters, A. Hoek, G. Tiittanen: Brunekreff, B. (2002). Particulate air pollution and risk of ST-segment depression during repeated submaximal exercise tests among subjects with coronary heart diseases. The exposure and risk assessment for fine and ultrafine particles in ambient air study. *Circulation*; 106: 933-8.
- Pérez-Esteve, E. Bernardos, A. Martínez-Máñez, R. Barat JM. (2013). Nanotechnology in the development of novel functional foods or their package. An overview based in patent analysis. *Apr*; 5(1): 35-43.
- PIP/COLEACP. (2011). *Principes d'hygiène et de management de la qualité sanitaire et phytosanitaire*. Récupéré de:
http://pip.coleacp.org/files/documents/COLEACP_Manuel_1_FR_0.pdf
- Plana, R. (2013). Les nanotechnologies, une filière entre promesses et interrogations. Récupéré de:
http://www.lemonde.fr/sciences/article/2013/04/10/les-nanotechnologies-une-filiere-entre-promesses-et-interrogations_3151370_1650684.html
- Poland, C. A., Duffin, R., Kinloch, I., Maynard, A., Wallace, W. A., Seaton, A., ... & Donaldson, K. (2008). Carbon nanotubes introduced into the abdominal cavity of mice show asbestos-like pathogenicity in a pilot study. *Nature nanotechnology*, 3(7), 423-428.
- Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE). (2004). Pourquoi l'approche cycle de vie? Récupéré de:
<<http://www.uneptie.org/pc/sustain/lcinitiative/publications.htm>>. Consulté le 22-10 2006.
- Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE). (2009). Lignes directrices pour l'analyse sociale du cycle de vie des produits. Récupéré de :
<http://www.unep.fr/shared/publications/pdf/DTIx1211xPAGuidelines%20for%20sLCA%20of%20Products%20FR.pdf>

- Quesnel, L (dir.). (1995). *Les sciences sociales et l'environnement*. Ottawa: les Presses de l'Université d'Ottawa, 223p.
- Ramachandraiah, K., Han, S. G., & Chin, K. B. (2014). Nanotechnology in meat processing and packaging, potential applications a review. *Asian-Australasian journal of animal sciences*, 28(2), 290-302. doi: 10.5713/ajas.14.0607.
- RNCOS. (2014). Global Nanotechnology. Récupéré de: http://www.rncos.com/Press_Releases/RNCOS-White-Paper-Global-Nanotechnology-Market-to-Grow-at-a-CAGR-of-16-Percent.htm
- Robinson, D. Morrison, M. J. (2010). Nanotechnologies for food packaging: Reporting the science and technology research trends Report for the ObservatoryNANO, Observatory NANO. 20 p.
- Roco, M.C. Bainbridge, W.S. (2001). Societal implications of nanoscience and nanotechnology. Boston, Kluwer Academic Publishers. Pages 3–4.
- Ronzani, C., Spiegelhalter, C., Vonesch, J. L., Lebeau, L., & Pons, F. (2012). Lung deposition and toxicological responses evoked by multi-walled carbon nanotubes dispersed in a synthetic lung surfactant in the mouse. *Archives of toxicology*, 86(1), 137-149.
- Rubilar, O. Diez, M.-C. Tortella, GR. Briceno, G. Marcato:-D. Duran, N. (2014). New strategies and challenges for nanobiotechnology in agriculture. *Biobased Mater Bioenergy* 8 (1): 1–12.
- Sanchez-Garcia, M. D., Hilliou, L., & Lagaron, J. M. (2010). Nanobiocomposites of carrageenan, zein, and mica of interest in food packaging and coating applications. *Journal of agricultural and food chemistry*, 58(11), 6884-6894. doi: 10.1021/jf1007659.
- Sánchez, C., Hortal, M., Aliaga, C., Devis, A., & Cloquell-Ballester, V. A. (2014). Recyclability assessment of nano-reinforced plastic packaging. *Waste management*, 34(12), 2647-2655. doi: 10.1016/j.wasman.2014.08.006.
- Siqueira, M. C., Coelho, G. F., de Moura, M. R., Bresolin, J. D., Hubinger, S. Z., Marconcini, J. M., & Mattoso, L. H. (2014). Evaluation of antimicrobial activity of silver nanoparticles for carboxymethylcellulose film applications in food packaging. *Journal of nanoscience and nanotechnology*, 14(7), 5512-5517.

- Silvestre, C., Duraccio, D., & Cimmino, S. (2011). Food packaging based on polymer nanomaterials. *Progress in Polymer Science*, 36(12), 1766-1782.
- Souza, V. G. L., & Fernando, A. L. (2016). Nanoparticles in food packaging: biodegradability and potential migration to food—A review. *Food Packaging and Shelf Life*, 8, 63-70.
- Störmer, A., Bott, J., Kemmer, D., & Franz, R. (2017). Critical review of the migration potential of nanoparticles in food contact plastics. *Trends in Food Science & Technology*.
- Sadrieh N, WokovichAM, GopeeNV, ZhengJ, HainesD, ParmiterD, etal.Lackof significant dermal penetration of titanium dioxide from sunscreen formulations containing nano and submicron-size TiO particules. *Toxicol sci* 2010; 115(1): 156–66.
- Santé Canada. s.d.a *Santé de l'environnement et du milieu de travail: Législation et directives*. En ligne. <<http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/legislation/index-fra.php>>. Consulté le 31-07-2014. Date de modification: 21-10-2011.
- Satterfield, T. Kandlikar, M. Beaudrie, C.E.H. Conti,J. Harthorn,B.H. (2009). The social life of nanotechnology. Scopus. [Base de données]. 4 (7. 52).
- Savolainen, K. Pylkkänen, L. Norppa, H. Falck, G. Lindberg, H. Tuomi, T. ... Seipenbusch, M. (2010). Nanotechnologies, engineered nanomaterials and occupational health and safety - A review. *Safety Science*, 48(957-963).
- Schulte: A., Geraci, C. L., Murashov, V., Kuempel, E. D., Zumwalde, R. D., Castranova, V., ... & Martinez, K. F. (2014). Occupational safety and health criteria for responsible development of nanotechnology. *Journal of Nanoparticle Research*, 16(1), 2153.
- Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks (SCENIHR). (2011). Nanosilver : safety, health and environmental effects and role in antimicrobial resistance. Récupéré de: http://ec.europa.eu/health/scientific_committees/emerging/docs/scenihr_o_039.pdf

- Sebbane, M. (2010). *L'émergence des nanotechnologies dans un contexte de développement durable*. (Thèse de maîtrise). Centre universitaire de formation en environnement. Université de Sherbrooke. Récupéré de : https://www.usherbrooke.ca/environnement/fileadmin/sites/environnement/documents/Essais2009/Sebbane_M__Sommaire_.pdf
- Shvedova, A. Kisin, E. Murray, A. Johnson, V. Gorelik, O. Arepalli, S. Kaagan. (2008). Inhalation of carbon nanotubes induces oxidative stress and cytokine response causing respiratory impairment and pulmonary fibrosis in mice. *Toxicologist*, 102, A1497.
- Shvedova, A., Pietroiusti, A. Fadeel, B. Kagan, V. (2012). Mechanisms of carbon nanotubes- induced toxicity : focus on oxydatif stress. Review article. *Tox Appl Pharm*, 261 : 121- 133.
- Siegrist, M. Keller, C. Kastenholz, H. Frey, S. Wiek, A. (2007). Risk Anal. Scopus. [Base de données]. 27. 59.
- Siegrist, M., Stampfli, N., Kastenholz, H., & Keller, C. (2008). Perceived risks and perceived benefits of different nanotechnology foods and nanotechnology food packaging. *Appetite*, 51(2), 283-290.
- Silvestre, C., Duraccio, D., & Cimmino, S. (2011). Food packaging based on polymer nanomaterials. *Progress in Polymer Science*, 36(12), 1766-1782.
- Smolander, M. Chaudhry, Q. (2010). Nanotechnologies in Food Packaging: Nanotechnologies in Food. RSc Publishing. 86-101.
- Song, H. Li, B. Lin, Q.-B, Wu, H.-J, Chen, Y. (2011). Migration of silver from nanosilver- polyethylene composite packaging into food simulants. *Food Addit Contam A* 28(12): 1758–62.
- Tager, J. (2014). Nanomaterials in food packaging : FSANZ fails consumers again. *Chain Reaction* (122): 16–17.
- Takeuchi, M.-T. Kojima, M. Luetzow, M. (2014). State of the art on the initiatives and activities relevant to risk assessment and risk management of nanotechnologies in the food and agriculture sector s. *Food Res Int* 64: 976–81
- Tchangna, M.-C. (2008). *Les nanotechnologies et les risques de santé*. (Mémoire de maîtrise). Université de Toulous en France. Récupéré de: [http// : www.fne.asso.fr/transfert/nanotechnologies/page_nano_a20.pdf](http://www.fne.asso.fr/transfert/nanotechnologies/page_nano_a20.pdf).

- Thorpe, B. (2014). *Nanoparticules Dans Les Cosmétiques Et Les Produits D'usage Courant: Non étiquetés, inquiétants*. Récupéré le 29 septembre 2014 de: <http://www.bcam.qc.ca/fr/content/nanoparticules-dans-les-cosmétiques-et-les-produits-dusage-courant>.
- Tissandié, C. Knapp, Y. (2009). Emballage – Environnement: bilan et perspectives. Récupéré de: http://www.cairn.info/zen.php?ID_ARTICLE=RINDU_084_0027
- Toma, O. (2013). Confirmation: certaines nanoparticules sont cancérogènes. Récupéré de: <http://politiquedesante.fr/2013/05/21/confirmation-certaines-nanoparticules-sont-cancerogenes/>
- Tourinho: S., Van Gestel, C. A., Lofts, S., Svendsen, C., Soares, A. M., & Loureiro, S. (2012). Metal-based nanoparticles in soil: Fate, behavior, and effects on soil invertebrates. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 31(8), 1679-1692.
- United States Environmental Protection Agency (USEPA). (2013). *Nanomaterials EPA is assessing*. The United States Environmental Protection Agency Website. Récupéré de: <http://www.epa.gov/nanoscience/quickfinder/nanomaterials.htm>.
- Urrea, J.-A.-G. (2013). On the exposure assessment of engineered nanoparticles in aquatic environments. PhD Göteborgs University.
- Urvoy, J-J. et Sanchez, S. (2007). Packaging: Toutes les étapes du concept au consommateur. Récupérer de : <http://197.14.51.10:81/pmb/GESTION2/MARKETING/packaging.pdf>
- Vandamme, T.-F. (2013). *Prospects of Therapeutic Applications of Nanotechnologies in Veterinary Medicine*. Récupéré de: <http://.academie-veterinairedefrance.org/>
- Vandelac, L. (2006). L'approche écosanté ou la viabilité du monde, *FrancVert*, Vol.3-2, printemps 2006. Récupéré de: <http://www.francvert.org/pages/32dossierlaprocheecosanteoulaviabilite.asp#>

- Vandelac, L. (2015). Nanofood: l'étrange avenir alimentaire ou le Talon d'Achille des nanotechnologies ? *Dictionnaire de la pensée écologiste*, Dominique Bourg et Alain Papaux Eds. Presses universitaires de France, Paris, octobre 2015.
- Vandelac, L. Beaudoin, S. (2010). Nanotechnologies et alimentation, enjeux et défis santé, environnement, sociétés et politiques publiques, *Revue Environnement, Risques et santé (ERS)* n°5 sept. Oct 2009, Éd. John Libbey Eurotext. Actes Environnement & Santé mars 2010, Un.de Caen Basse-Normandie
- Vinck, D. (2009). *Les Nanotechnologies*. France: Le cavalier bleu édition. 128p
- Vivien, F.-D. (2005). *Le Développement Soutenable*. Paris: La Découverte.
- Von der Kammer, F., Ferguson: L., Holden: A., Masion, A., Rogers, K. R., Klaine, S. J., ... & Unrine, J. M. (2012). Analysis of engineered nanomaterials in complex matrices (environment and biota): general considerations and conceptual case studies. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 31(1), 32-49.
- Von Lowis. Stewart, R. Blaise, N. Messmer, J.-G. (2012). Alimentation durable. 401. 1-12
- Wang, J.-W. Wang, M.-H. Jang L.-S. (2010). Effects of electrode geometry and cell location on single- cell impedance measurement. *Biosensors and Bioelectronics*, 25 (6).1271-1276.
- Wang, C. T., & Ro, S. H. (2006). Surface nature of nanoparticle gold/iron oxide aerogel catalysts. *Journal of non-crystalline solids*, 352(1), 35-43.
- Watson, C. Y., Molina, R. M., Louzada, A., Murdaugh, K. M., Donaghey, T. C., & Brain, J. D. (2015). Effects of zinc oxide nanoparticles on Kupffer cell phagosomal motility, bacterial clearance, and liver function. *International journal of nanomedicine*, 10, 4173. doi: 10.2147/IJN.S82807.
- Weiland, E. (2009). *Achats et Développement durable : le cas du secteur tertiaire*. Paris: L'Harmattan.
- Wiesner M. Bottero J.-Y. (2007). Environmental nanotechnology: Applications and impacts of nanomaterials. 16-17.

- WinterGreen Research Inc. (2004). *Nanotechnology Market Opportunities, Strategies, and Forecasts, 2004 to 2009*. Récupéré de:
http://www.researchandmarkets.com/reportinfo.asp?report_id=222366.
- Wyser, Y., Adams, M., Avella, M., Carlander, D., Garcia, L., Pieper, G., ... & Weiss, J. (2016). Outlook and Challenges of Nanotechnologies for Food Packaging. *Packaging Technology and Science*, 29(12), 615-648.
- Yang, H. (2005). Principles for characterizing the potential human health effects from exposure to nanomaterials: elements of a screening strategy. *Part Fibre Toxicol* 2(1): 8.
- Yezza, I. (2013). *Les nanotechnologies dans les emballages alimentaires: menace ou révolution?* Consulter le: 15 juin 2015. Récupéré de:
<http://fr.slideshare.net/islemyezza/les-nanotechnologies-dans-les-emballages-alimentaires-menace-ou-rvolution>
- Zhao, S., Yue, C., & Wang, Y. (2016). How Information Affects Consumer Acceptance of Nano-packaged Food Products. In *2016 Annual Meeting, July 31-August 2, 2016, Boston, Massachusetts* (No. 235602). Agricultural and Applied Economics Association.
- Zhou, G. (2013). Nanotechnology in the food system: consumer acceptance and willingness to pay.